

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**Emulador de una comunicación vía satélite
en banda Ku para su uso en laboratorio de
prácticas: Diseño y simulación**

**(Ku-band satellite communication system
emulator for use in a practical laboratory:
Design and simulation)**

Para acceder al Título de

***Máster Universitario en
Ingeniería de Telecomunicación***

Autor: José Bengoechea Cuadrado

Septiembre - 2020



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

Realizado por: *José Bengoechea Cuadrado*

Director del TFM: *Amparo Herrera Guardado*

Título: “ *Emulador de una comunicación vía - en banda Ku para su uso en laboratorio de prácticas: Diseño y simulación*”

Title: “*Ku-band satellite communication system emulator for use in a practical laboratory: Design and simulation*”

Presentado a examen el día:

para acceder al Título de

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre):

Secretario (Apellidos, Nombre):

Vocal (Apellidos, Nombre):

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFM
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Máster N°
(a asignar por Secretaría)

Agradecimientos

A la directora de mi trabajo, Amparo Herrera, por su dedicación, ayuda y disponibilidad.

A mis padres por estar ahí en todo momento.

A Don Gregorio y Doña Ana María, por tratar de hacérmelo todo más fácil.

A Don José y Doña Bonifacia, porque desde allá lejos seguro que os sentís muy orgullosos.

A mi primo Armando, que nada me haría más feliz que el que te dices cuenta de que te lo estoy agradeciendo.

A mis Cristinas, que han sido siempre un ejemplo.

A mi amada novia Ana por su cariño y bondad conmigo. ¡A la siguiente te toca a ti ponerme en los agradecimientos!

Palabras clave

Satélite, Emulador, Emulador de Satélite, Comunicación por Satélite, Sistema de comunicación por satélite, banda Ku, TX Box, RX Box, Minisat

Keywords

Satellite, Emulator, Satellite Emulator, Satellite Communication, Satellite Communication System, Ku-Band, TX Box, RX Box, Minisat

ÍNDICE

Capítulo 1: Introducción	1
Capítulo 2: Balance de enlace	3
2.1. Balance de enlace	4
2.1. Relación C/N	5
Capítulo 3: Simulaciones	7
3.1. Cadena TX	9
3.2. Cadena SAT	16
3.3. Cadena RX.....	21
3.4. Resultados de las simulaciones	26
3.4.1. Simulación de potencia y ganancia	29
3.4.2. Simulación de figura de ruido.....	32
3.4.3. Simulación de ganancia de compresión	36
3.4.4. Simulación TOI y CIMD	39
3.4.5. Simulación Espurios	43
3.4.6. Simulación LSSP	45
3.4.7. Simulación CNR.....	50
Capítulo 4: Sistema y equipos.....	51
4.1. Sistema TX.....	52
4.1.1. Caja TX-Box	54
4.1.2. PCB de radiofrecuencia	58
4.1.3. Placa de alimentación TX-Box	63
4.2. Sistema SAT	65
4.2.1. Caja MiniSAT	66
4.2.2. Alimentación del MiniSAT	70

4.2.3. PCB de radiofrecuencia del MiniSAT	77
4.3. Sistema RX	82
4.3.1 Caja RX-Box	84
4.1.2. PCB de radiofrecuencia	87
4.1.3. Placa de alimentación RX-Box	91
4.4. Presupuesto	92
Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras	98
Bibliografía.....	100
Anexo 1: Simulaciones en ADS: Ecuaciones para calcular la potencia y ganancia	102
Anexo 2: Simulaciones en ADS: Ecuaciones para calcular la figura de ruido	104
Anexo 3: Simulaciones en ADS: Ecuaciones para calcular la ganancia de compresión	106
Anexo 4: Simulaciones en ADS: Ecuaciones para calcular el TOI y CIMD	107
Anexo 5: Simulaciones en ADS: Ecuaciones para calcular el CNR	110
Anexo 6: Planos de la TX-Box.....	113
Anexo 7: Planos del MiniSAT	115
Anexo 8: Planos de la RX-Box	117

Capítulo 1: Introducción

Las comunicaciones vía satélite están en todas partes, pero en muchas ocasiones son invisibles para el público en general. Esto se puede considerar un éxito puesto que demuestra una integración satisfactoria en el mercado general de las telecomunicaciones. Sin embargo, este desconocimiento supone, con demasiada frecuencia, un obstáculo para la comprensión adecuada de su importancia vital para tener un mundo interconectado.

Por esta razón, en el Máster Universitario de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria se imparte la asignatura “Sistemas de Telecomunicación” (M1598) enfocada a permitir al alumno adquirir conocimientos sobre este tipo de sistema.

Así pues, en las prácticas de esta asignatura se diseña un sistema de comunicaciones por satélite en banda Ku. Para ello, se realizan simulaciones mediante software (Advances Design System), así como medidas de los componentes mediante la instrumentación adecuada en el laboratorio. Sin embargo, en la parte de medida, solo se puede medir los equipos hasta la frecuencia intermedia de 2.4 GHz debido a la limitación en frecuencia de los instrumentos de medida del laboratorio de prácticas, así como de los componentes disponibles.

En este TFM, se busca diseñar un emulador de los bloques que van de frecuencia intermedia hasta la banda Ku, tanto ascendente como descendente, así como diseñar un emulador del satélite, para poder realizar la comunicación completa. Por lo tanto, los objetivos concretos de este trabajo son los siguientes:

- Realizar el diseño de la estructura, alimentación y comunicación de un equipo que emula un satélite en banda Ku.
- Realizar el diseño de la estructura, alimentación y comunicación de un equipo asociado al sistema transmisor de una comunicación vía satélite. Este equipo permite aumentar la frecuencia del sistema desde una banda intermedia hasta la banda Ku necesaria para realizar la transmisión.

- Realizar el diseño de la estructura, alimentación y comunicación de un equipo asociado al sistema receptor de una comunicación vía satélite. Este equipo permite disminuir la frecuencia del sistema desde la banda Ku hasta una banda intermedia necesaria para la recepción.

A estos tres equipos se les ha puesto los nombres **TX-Box**, **MiniSAT** y **RX-Box**, correspondiendo con el equipo asociado al transmisor, al satélite y al receptor, respectivamente. Visto de otra forma, estos tres equipos son una “caja negra” en la cual entra una señal a una frecuencia determinada y se obtiene, en su salida, dicha señal amplificada a una frecuencia diferente.

En la figura siguiente se observa un diagrama de bloques que representa el sistema de comunicaciones vía satélite. En él, se observa la función de cada equipo.

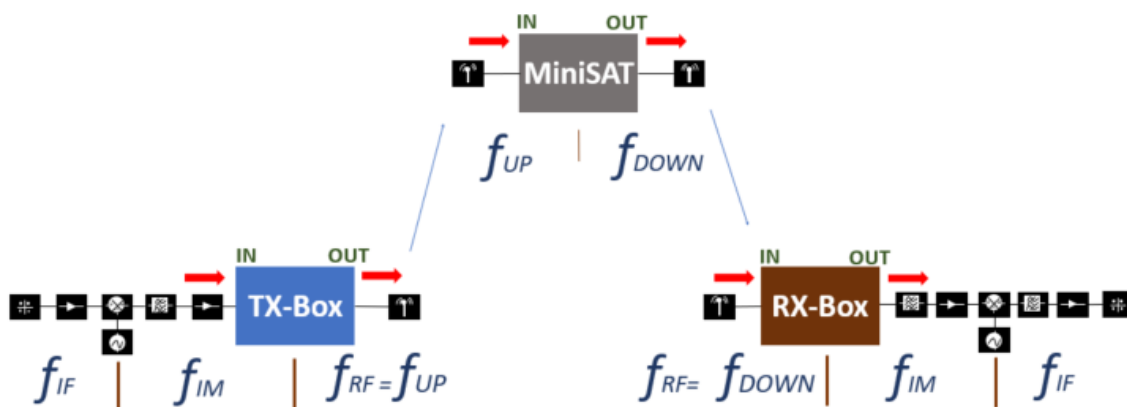


Figura 1-Diagrama de bloques del sistema de comunicación por satélite que se desea emular

Los diseños realizados en este Trabajo de Fin de Máster permiten variar la frecuencia intermedia, así como las frecuencias uplink y downlink hasta un cierto límite. Sin embargo, siempre se garantiza la utilización de la banda Ku tanto en el enlace ascendente como descendente.

Así todo, para facilitar los cálculos en las simulaciones realizadas, se ha fijado la frecuencia IF a 550 MHz, la frecuencia intermedia a 2.4 GHz, y las frecuencias uplink y downlink a 17.8 y 15.7 GHz, respectivamente.

Así pues, en el capítulo 2 de este documento, se desarrollan los cálculos de balance de enlace necesarios para el correcto funcionamiento del sistema. En el capítulo 3 se aportan los resultados de las simulaciones de radiofrecuencia efectuadas para comprobar su correcto funcionamiento. Por último, en el capítulo 4 se describe la estructura, sistema de alimentación y PCB de radiofrecuencia de cada uno de los equipos.

Capítulo 2: Balance de enlace

Para llevar a cabo todo sistema de comunicación vía satélite es necesario realizar previamente su balance de enlace con el fin de poder obtener una serie de requerimientos que ha de pasar el diseño del sistema que se desee implementar.

Así pues, en este Trabajo de Fin de Máster, se han de realizar los mismos cálculos partiendo de unas frecuencias ascendente y descendente fijas, de 17.8 y 15.7 GHz, respectivamente. Además, el balance de enlace que se detalla en este capítulo está referido a la localidad de Santander, que es en donde se imparten las prácticas de la asignatura “Sistemas de Telecomunicación” del Máster en Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria.

En las secciones siguientes de este capítulo se detallarán los cálculos empleados, así como los resultados de dicho balance.

Para ello, se partirá de una distancia máxima de 20 metros entre la posición del transmisor y/o receptor respecto al emulador del satélite. Se parte de esta distancia puesto que la idea es que el emulador del satélite se encuentre, o bien dentro de la misma sala de laboratorio, o bien en el exterior, a escasos metros de distancia.

Cabe destacar que en el balance de enlace que se muestra a continuación, para el cálculo de pérdidas totales, no se tiene en cuenta las pérdidas de lluvia ni de otras condiciones meteorológicas. Esto se debe a que se recomienda no colocar en el exterior el emulador del satélite en caso de que llueva puesto que no se garantiza la impermeabilidad completa del emulador y, por tanto, su correcto funcionamiento en condiciones meteorológicas adversas. Además, para una distancia tan corta del enlace, las pérdidas son irrelevantes.

2.1. Balance de enlace

Para realizar el balance de enlace, se tiene en cuenta el peor de los casos. Así pues, como se ha explicado anteriormente, se parte de los datos siguiente:

- $f_{UL} = 17.8 \text{ GHz}$
- $f_{DL} = 15.7 \text{ GHz}$
- distancia TX-SAT = 20 metros
- distancia SAT-RX = 20 metros

En primer lugar, se calculan las pérdidas básicas de propagación que, en este caso supondrán las pérdidas totales del sistema ya que no se tienen en cuenta otras pérdidas como las de lluvia o gases. Según la recomendación de la **ITU-R P.525-2 [1]** para el cálculo de la atenuación en el espacio libre, esta ecuación viene dada por la siguiente expresión.

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d \quad [\text{dB}]$$

donde **L_{bf}** son las pérdidas básicas de propagación en el espacio libre, **f** la frecuencia en MHz y **d** la distancia en kilómetros.

Ecuación 1

Así pues, de la ecuación anterior se obtiene que:

- $L_{bf} [\text{uplink}] = 83.43 \text{ dB}$
- $L_{bf} [\text{downlink}] = 82.34 \text{ dB}$

2.2. Relación C/N

Cabe destacar que para realizar la mayoría de estos cálculos se parte de datos ficticios que puede que luego no se apliquen en la realidad, pero es la única forma de tener una idea de cómo va a funcionar el sistema antes de decidirse a implementarlo.

La relación entre la potencia de la señal portadora y la señal de ruido ha de calcularse para ambos enlaces (ascendente y descendente). Se puede calcular mediante la ecuación siguiente.

$$\frac{C}{N} [dB] = PIRE + \frac{G}{T} - k - Lt - B$$

Ecuación 2

De esta ecuación, se distinguen diferentes parámetros.

- **PIRE:** Potencia de la señal transmitida junto con la ganancia de la antena transmisora.

Se considera una potencia de señal transmitida en el enlace TX-SAT y SAT-RX de +2dBm y -12 dBm, respectivamente. Además, se parte de una situación pobre de ganancia de las antenas, de 0 dB.

- **G/T:** Relación entre la ganancia de la antena receptora y la temperatura del ruido.

Para situarnos en el peor de los casos, se parte de un valor de 0 dB·K.

- **K:** -228,6 dBw/K·Hz
- **Lt:** Pérdidas totales de propagación.

Para este caso, LtUP y LtDOWN son 83.43 y 82.34 dB, respectivamente, como se pudo ver en la sección anterior de este capítulo.

- **B:** Ancho de banda que se utiliza en la transmisión (dB).

Se decide partir de un ancho de banda de 50 MHz ya que, utilizando, por ejemplo, una modulación QPSK, permitiría velocidades superiores a los 60 Mbps en el peor de los casos. Velocidad más que suficiente para poner a

prueba el sistema en prácticas de la asignatura “Sistemas de Telecomunicación” de la Universidad de Cantabria.

Así pues, aplicando la ecuación 2, se obtiene que:

- C/N [Uplink] = 70.18 dB
- C/N [Downlink] = 57.27 dB

Por último, la C/N total se calcula mediante la ecuación siguiente.

$$\frac{C}{N_{TOTAL}} = \left(\frac{1}{\frac{C}{N_{UP}}} + \frac{1}{\frac{C}{N_{DOWN}}} \right)^{-1}$$

Ecuación 3

En este caso, la **relación portadora-ruido del sistema** da como resultado **57.05 dB**. El cual es un valor que permite de manera más que suficiente llevar a cabo el sistema.

Capítulo 3: Simulaciones

Para comprobar el correcto funcionamiento de los 3 subsistemas de radiofrecuencia (TX, RX y SAT) así como el sistema global en su conjunto, se han realizado simulaciones mediante el software ADS (Advanced Design System).

Con el fin de obtener simulaciones más completas y reales, se ha añadido en ADS a cada subsistema un conjunto de componentes que, aunque no tengan cavidad dentro de este proyecto, sirven como referencia para la comprobación de dicho funcionamiento. Además, la mayoría de estos componentes se encuentran en el laboratorio, por lo que puede hacerse uso de ellos en las prácticas de la asignatura. Estos componentes junto con la TX-Box y RX-Box simulan las cadenas transmisoras y receptoras, respectivamente, de un sistema de comunicación vía satélite. Además, las antenas también son simuladas en ADS.

En el sistema TX, estos componentes comprenden aquellos conectados a la entrada de la TX-Box que permiten amplificar, filtrar y mezclar una señal de forma que pase de una frecuencia IF a una frecuencia intermedia y con una potencia admisible por la TX-Box. Además de una antena conectada a la salida de la TX-Box. En la figura siguiente se muestra el diagrama de bloques del sistema TX simulado en ADS.

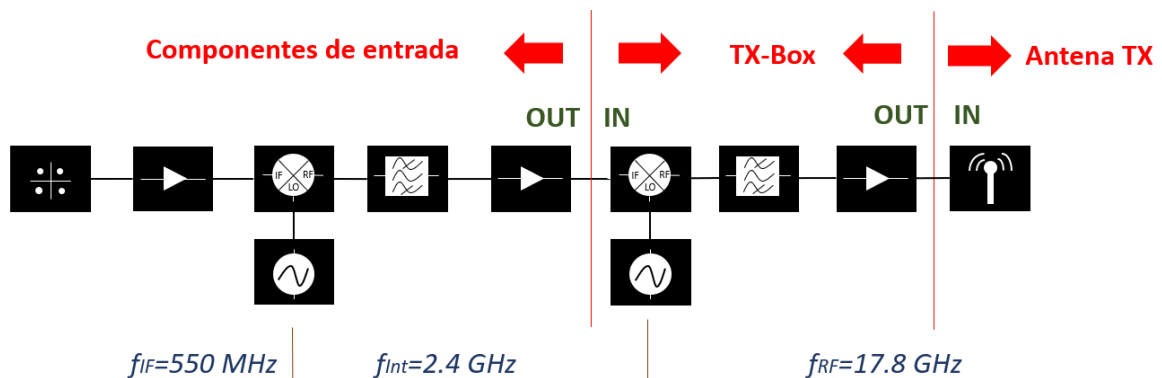


Figura 2-Diagrama de bloques del sistema TX utilizado en las simulaciones de ADS

En el sistema RX, estos componentes permiten, además de amplificar la señal, disminuirla a una frecuencia intermedia y, posteriormente, a una frecuencia IF. Para ello, se conectan a la salida de la RX-Box. Además, a la entrada de la RX-Box se conecta una antena. En la figura siguiente se muestra el diagrama de bloques del sistema RX simulado en ADS.

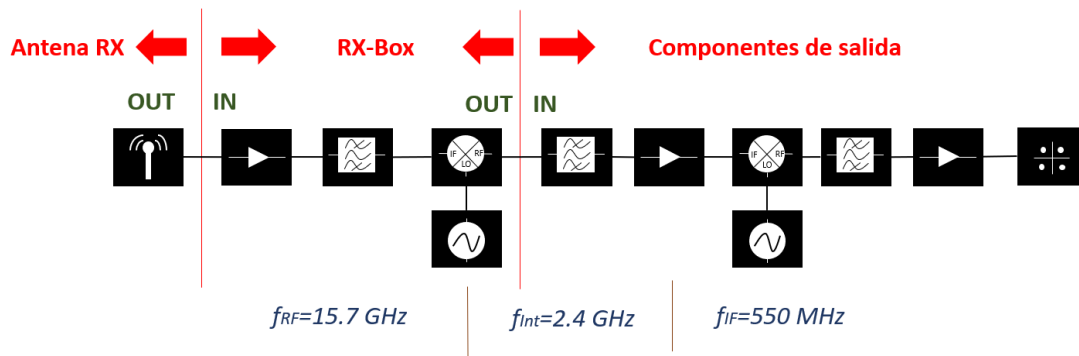


Figura 3-Diagrama de bloques del sistema RX utilizado en las simulaciones de ADS

En el sistema SAT, únicamente se añaden las antenas en la simulación mediante filtros paso banda. En la figura siguiente se muestra el diagrama de bloques del sistema SAT simulado en ADS.

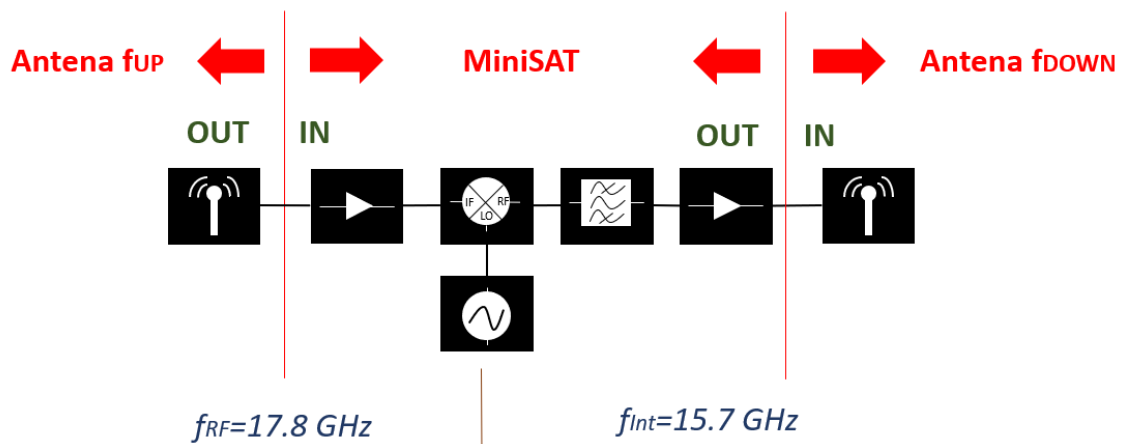


Figura 4-Diagrama de bloques del sistema SAT utilizado en las simulaciones de ADS

3.1. Cadena TX

En el diseño del sistema en ADS, la cadena TX es vista como una “caja negra” que posee:

- Una entrada, por la que accede la señal principal que contiene la información a enviar.
- Una salida, por la cual ha de salir la señal principal tras ser modificada en la cadena.
- Dos entradas por las cuales acceden las señales procedentes de los dos osciladores locales.

En la figura siguiente se muestra dicho bloque.

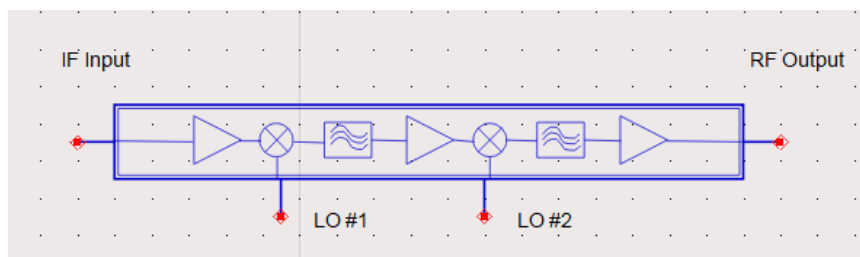
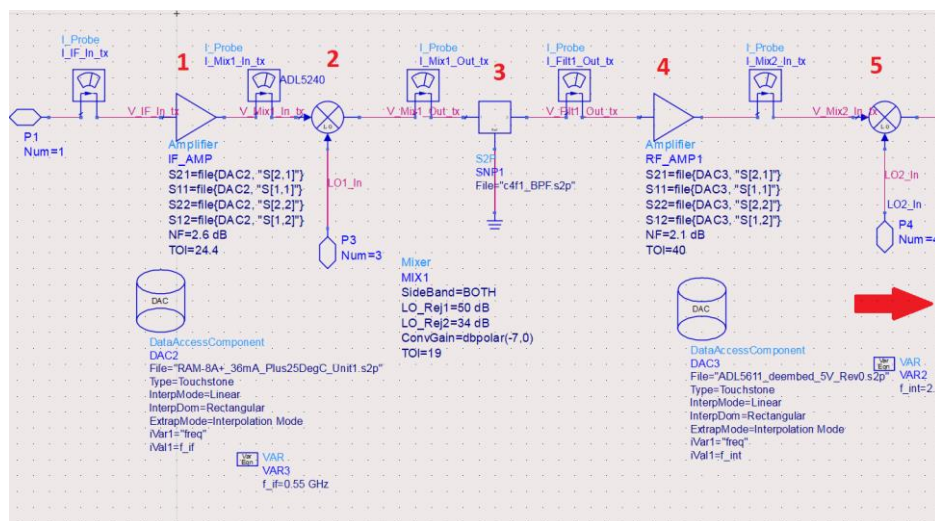
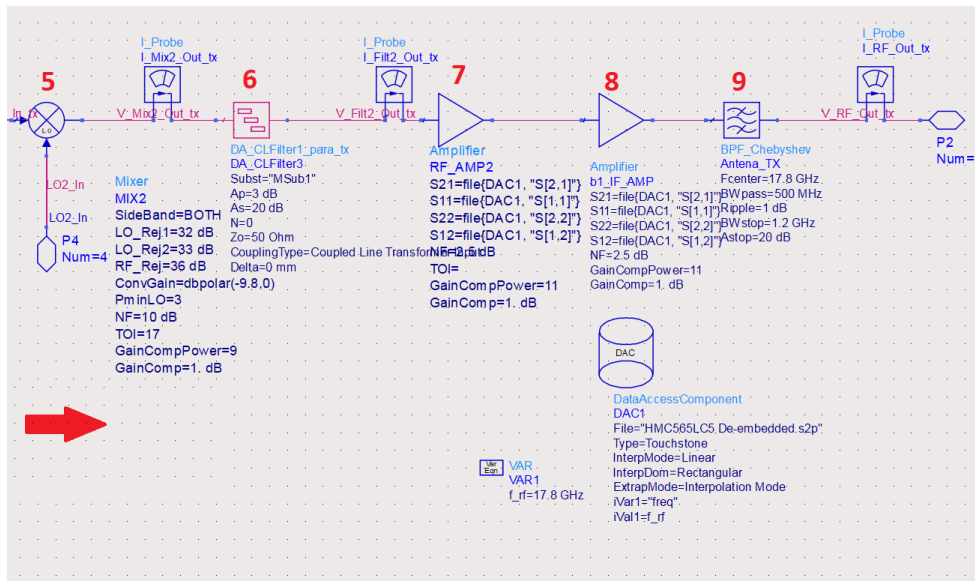


Figura 5-Bloque de ADS correspondiente con la cadena TX.

A continuación, se muestra el esquemático completo correspondiente a la cadena TX, es decir, los elementos internos que componen el bloque mostrado en la figura anterior, desde la entrada de la señal principal hasta su salida.



(A)



(B)

Figura 6-Esquemático de la cadena TX. (A) Desde el 1º componente hasta el 5º. (B) Desde el 5º componente hasta el 9º.

A continuación, se describe cada componente en orden.

1. Amplificador ADL5240

Es el primer componente que se observa en la cadena. Se trata del amplificador ADL5240 de Analog. Dicho componente se modela mediante un modelo no lineal que es capaz de representar tanto los parámetros en lineales en pequeña señal como los no lineales, ya sea individualmente o por ficheros.

En este caso, los parámetros S se leen a través de un bloque de simulación “DAC” (Bloque que accede a un fichero de datos del ordenador) y los no lineales (NF y TOI) se han representado numéricamente, partiendo de los datos aportados por el fabricante en el datasheet del componente [2].

El fichero de parámetros S es proporcionado por el fabricante. Para asegurar que la frecuencia que se toma de estefichero es la correcta, se debe de fijar el valor con una variable. En este caso, Val1= f_if (frecuencia IF), ya que a lo largo de la cadena la frecuencia va variando, y en el fichero de parámetros S la variable es “freq”, que es una variable reservada cuando se hace análisis de pequeña señal en parámetros S.

En la figura siguiente, se muestran los bloques que representan dicho componente en ADS.

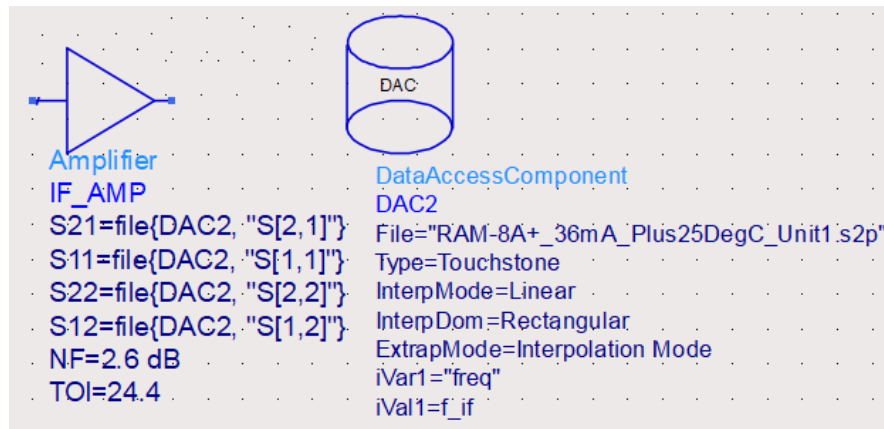


Figura 7-Bloques representativos del amplificador ADL5240 en ADS.

2. Mezclador SYM-30DLHW

Es el siguiente elemento de la cadena. Se trata de un mezclador en modo upconverter del fabricante Minicircuits. En las simulaciones es representado tomando como referencia algunos parámetros del datasheet del fabricante [3]. En la figura siguiente se muestra el bloque que corresponde con dicho componente.

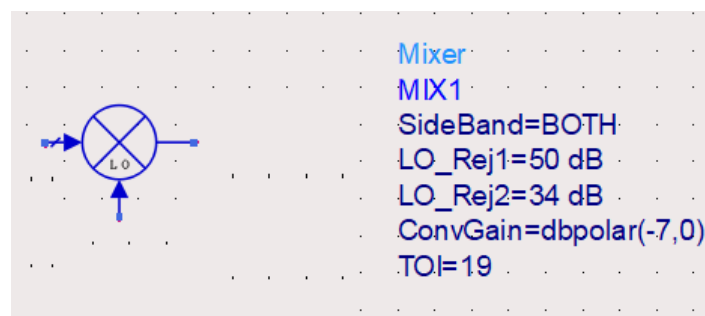
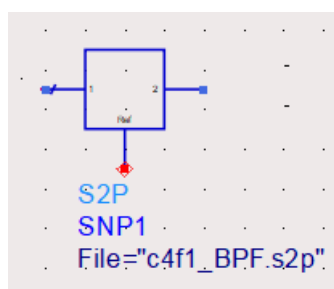


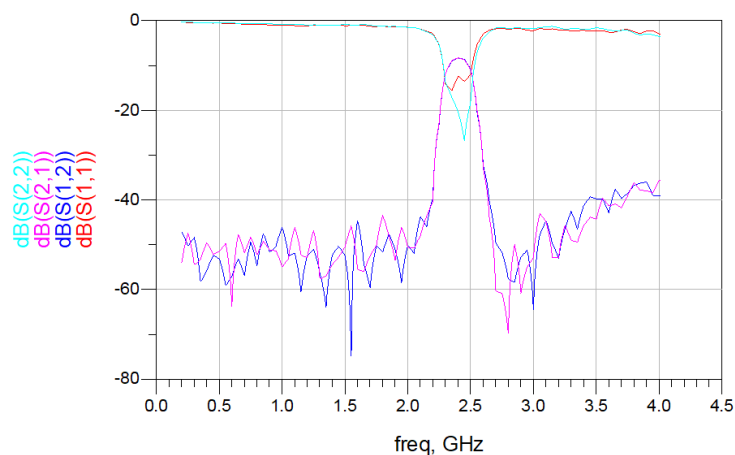
Figura 8-Bloque que representa al mezclador SYM-30DLHW en ADS.

3. Filtro c4f1 BFP

El siguiente componente corresponde con un filtro paso banda no comercial existente en el laboratorio del cual se conocen sus parámetros S, y son utilizados para su representación en ADS. En la siguiente imagen se muestra el bloque que representa dicho componente, así como sus parámetros S.



(A)



(B)

Figura 9-Filtro c4f1 del laboratorio. (A) Bloque de representación en ADS. (C) Parámetros S.

4. Amplificador ADL5611

El siguiente componente de la cadena es el amplificador ADL5611 de Analog. En las simulaciones. Éste se modela de la misma forma que el amplificador anterior. Representado mediante un fichero de parámetros S facilitado por el fabricante, así como datos de su NF y TOI obtenidos de su datasheet [4].

En la figura siguiente, se muestran los bloques que representan dicho componente en ADS.

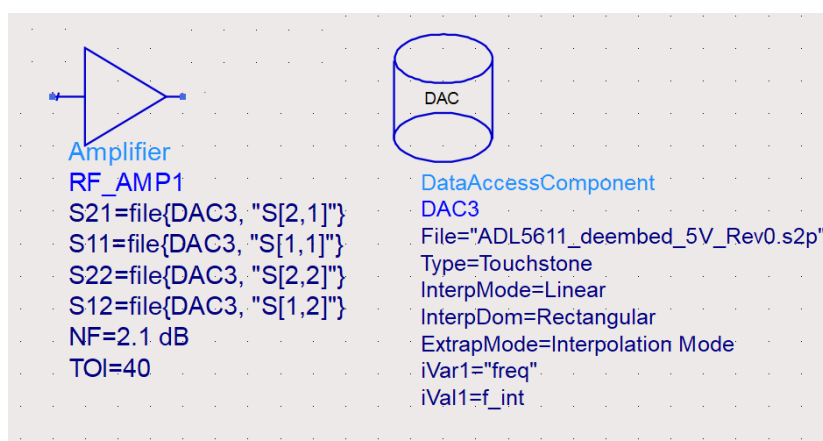


Figura 10-Bloques que representan el amplificador ADL5611 en ADS.

5. Mezclador HMC554A

El siguiente componente de la cadena es el mezclador HMC554A, el cual es el primer elemento que ya forma parte de la TX-Box.

En las simulaciones es representado tomando como referencia algunos parámetros del datasheet del fabricante [5]. En la figura siguiente se muestra el bloque que corresponde con dicho componente.

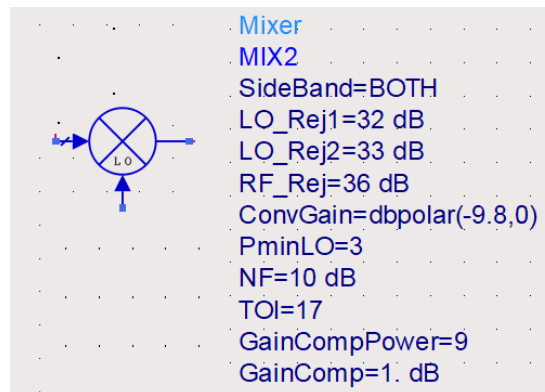


Figura 11-Bloque que representa al mezclador HMC554A en ADS.

6. TX Filter

El siguiente componente de la cadena es un filtro paso banda centrado en 17.8 GHz. Se trata de un filtro diseñado en ADS mediante líneas acopladas sobre un sustrato Rogers RO4003C de H=0.22 mm y $\epsilon_r=3.55$ de simulación.

En la figura siguiente se muestra el bloque que representan dicho filtro en ADS.

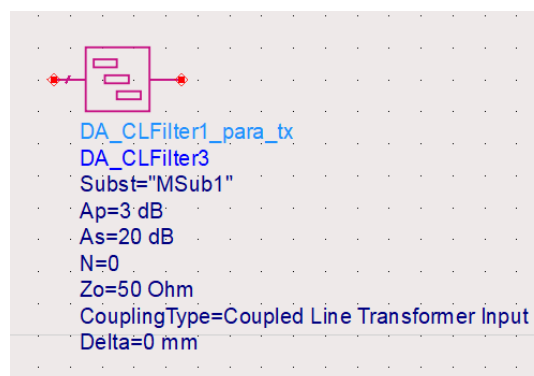


Figura 12-Bloque representativo del filtro TX de líneas acopladas diseñado en ADS.

El filtro mostrado en la figura anterior se compone de las líneas acopladas mostrados en la figura siguiente.

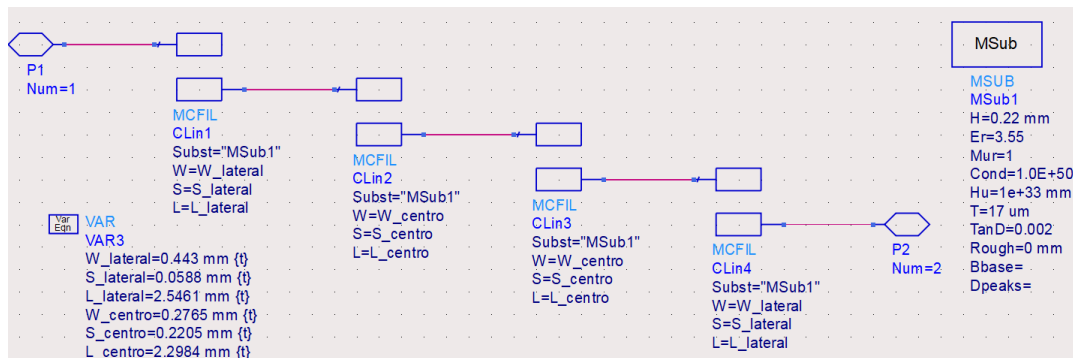


Figura 13-Bloques que representan las líneas acopladas y el sustrato del filtro TX en ADS

En la figura siguiente se muestran los parámetros S de dicho filtro. Su BW=1.5GHz para permitir la posibilidad de modificar la FUP del sistema en el futuro.

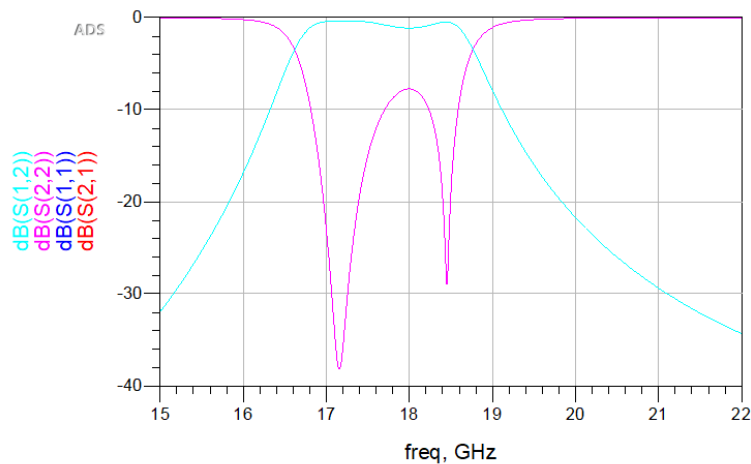


Figura 14-Parámetros S del filtro diseñado en la cadena TX.

7 y 8. Amplificadores HMC565LC5

Los siguientes componentes de la cadena son los amplificadores HMC656LC5 de Analog Devices. Se trata de dos amplificadores en serie modelados mediante un modelo no lineal representados por el fichero de parámetros S facilitado por el fabricante (a través de un bloque “DAC”), así como su NF y P1dB, obtenido del datasheet del componente [6].

En la figura siguiente se muestran los bloques que representan dichos componentes.

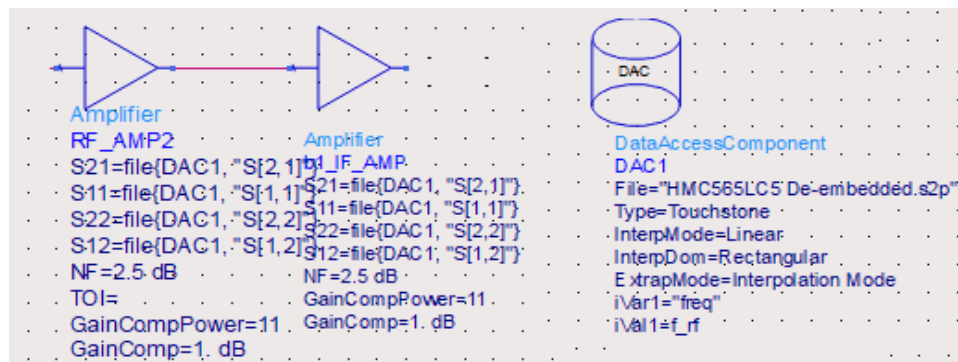
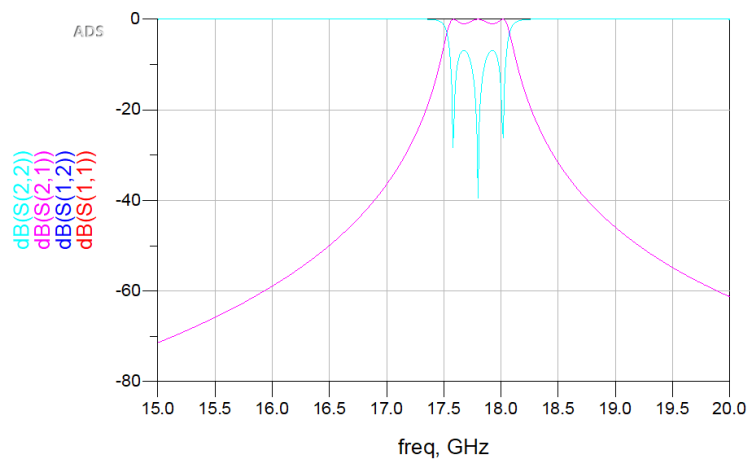
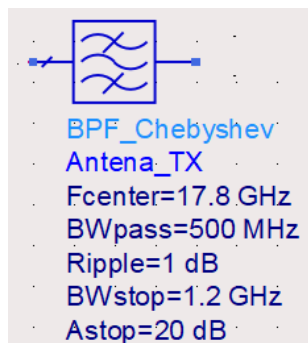


Figura 15-Bloques que representan los dos amplificadores HMC565LC5 en serie en ADS.

9. Filtro Chebyshev Antena TX

El siguiente y último componente es un bloque de ADS que representa un filtro paso banda Chebyshev con $f_c=17.8$ GHz y $BW=500$ MHz. Este filtro simula la antena del sistema TX. En la figura siguiente se muestra el bloque y parámetros S.



(A)

(B)

Figura 16-Filtro que representa en ADS la antena TX. (A) Bloque. (B) Parámetros S del filtro

3.2. Cadena SAT

En el diseño del sistema en ADS, la cadena SAT es vista como una “caja negra” que posee:

- Una entrada, por la que accede la señal principal que contiene la información a enviar.
- Una salida, por la cual ha de salir la señal principal tras ser modificada en la cadena.
- Una entrada por la cual accede la señal procedente del oscilador local.

En la figura siguiente se muestra dicho bloque.

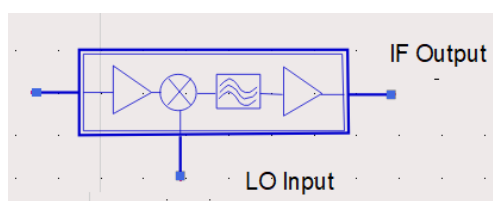
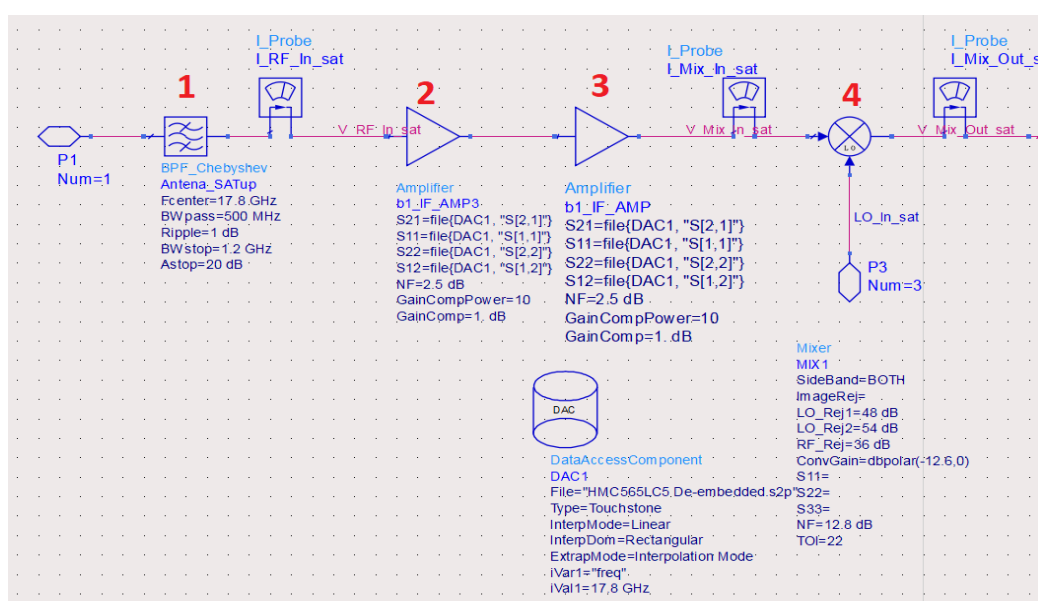
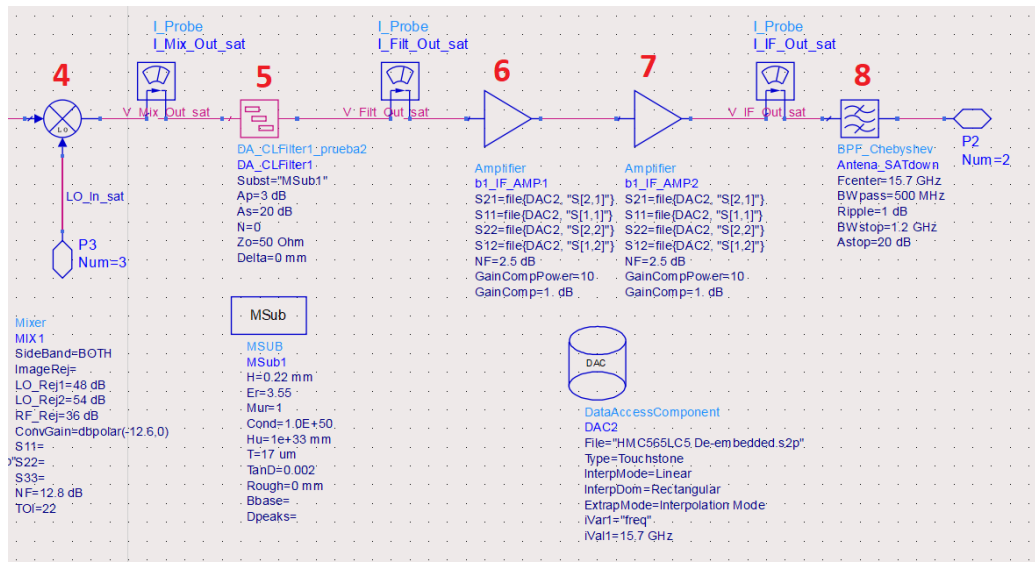


Figura 17-Bloque de ADS correspondiente a la cadena SAT.

A continuación, se muestra el esquemático completo correspondiente a la cadena SAT, es decir, los elementos internos que componen el bloque mostrado en la figura anterior, desde la entrada de la señal principal hasta su salida.



(A)



(B)

Figura 18-Esquemático de la cadena SAT. (A) Desde el 1º componente hasta el 4º. (B) Desde el 4º componente hasta el 8º.

A continuación, se describe cada componente en orden.

1. Filtro Chevyshev Antena SATUP

Es el primer componente que se observa en la cadena SAT. Se trata de un bloque de ADS que representa un filtro paso banda Chevyshev con $f_c=17.8$ GHz y $BW=500$ MHz. Este filtro permite configurar la banda a la entrada de modo que no reciba otras señales que pudiesen saturar el LNA. Si la antena tuviese una banda lo suficientemente estrecha se podría eliminar no siendo necesaria la actuación del filtro.

En la figura siguiente se muestra el bloque que representa dicho filtro.

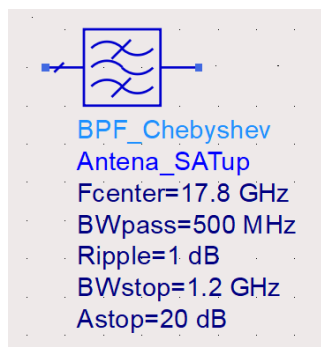


Figura 19-Bloque que representa la antena receptora del sistema SAT.

2 y 3. Amplificadores HMC545LC5 (Primera serie)

Los siguientes componentes de la cadena son dos amplificadores HMC545LC5 de Analog, los cuales son los mismos que los de la cadena TX y su representación es la misma.

4. Mezclador LTC5553

El siguiente componente de la cadena es el mezclador LTC5553 de Analog. En las simulaciones es representado tomando como referencia algunos parámetros del datasheet del fabricante [7].

El bloque representativo se muestra en la figura siguiente.

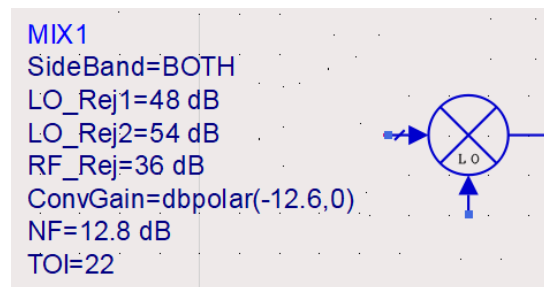


Figura 20-Bloque que representa al mezclador LTC5553 en ADS.

5. SAT Filter

El siguiente componente de la cadena es un filtro paso banda centrado en 15.7 GHz. Se trata de un filtro diseñado en ADS mediante líneas acopladas sobre un sustrato Rogers RO4003C de H=0.22 mm y $\epsilon_r=3.55$ de simulación.

En la figura siguiente se muestra el bloque que representan dicho filtro en ADS, así como sus parámetros Su BW es de 0.7 GHz para permitir la posibilidad de modificar la fDOWN del sistema en el futuro.

Además, se observa que, para la frecuencia de 13.6 GHz, tiene una caída de 64.32 dB. Esta frecuencia coincide con la frecuencia que tendrá la señal que entre por la antena receptora del MiniSAT proveniente de la antena transmisora puesto que entra una señal a una frecuencia de 15.7 GHz y es disminuida 2.1 GHz en frecuencia hasta los 13.6 GHz.

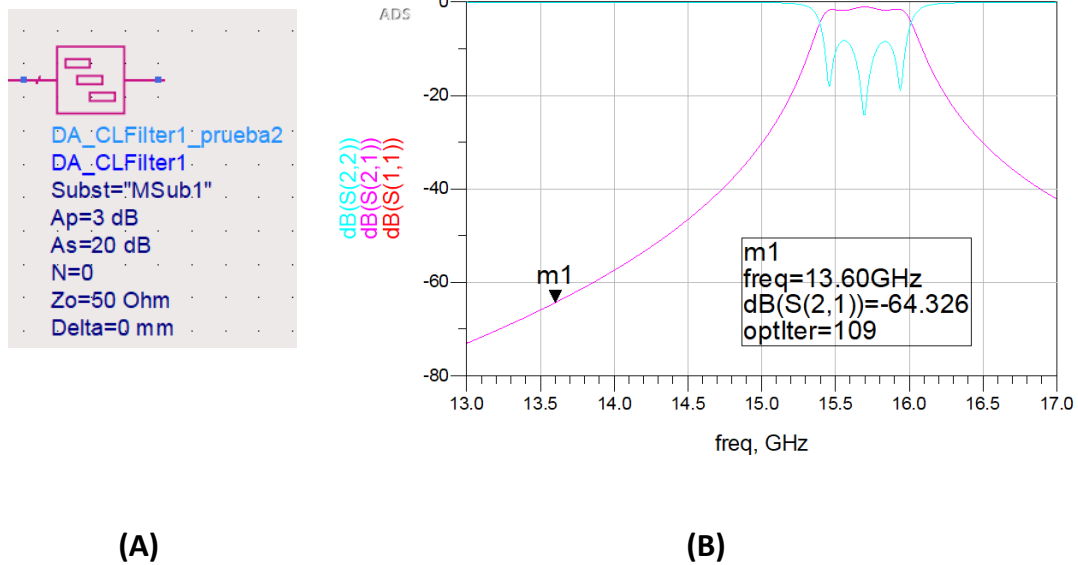


Figura 21-Parámetros S del filtro del satélite diseñado en ADS.

El filtro mostrado en la figura anterior se compone de las líneas acopladas de la figura siguiente.

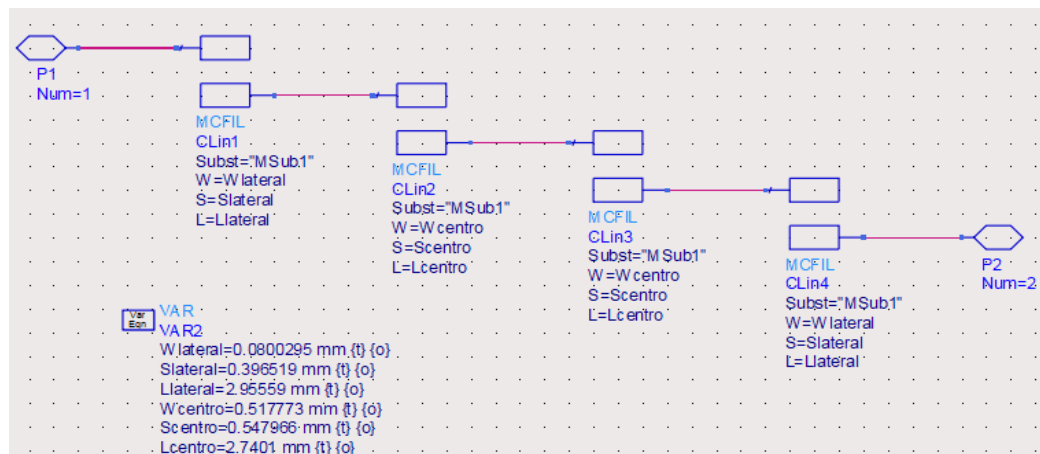


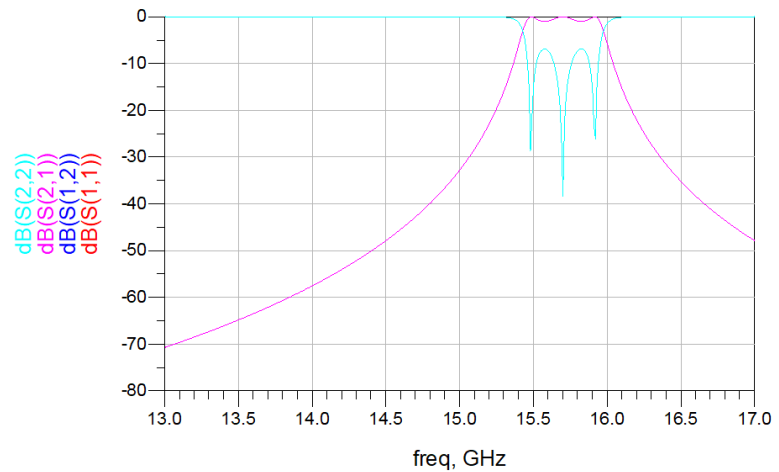
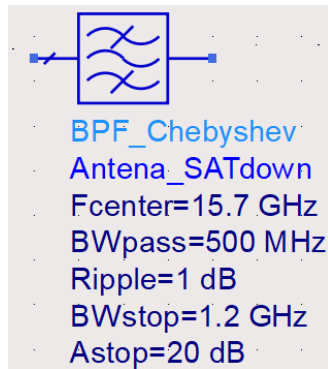
Figura 22-Bloques que representan las líneas acopladas y el sustrato del filtro SAT en ADS

6 y 7. Amplificadores HMC545LC5 (Segunda serie)

Los siguientes componentes de la cadena vuelven a ser dos amplificadores en serie modelo HMC535LC5, los cuales son los mismos que los de la cadena TX y su representación y modelado es el mismo.

8. Filtro Chebyshev Antena SATDOWN

Es el último componente que se observa en la cadena. Se trata de un bloque que representa un filtro paso banda Chebyshev con $f_c=15.7$ GHz y $BW=500$ MHz. Simula la antena transmisora del satélite y se muestra en la figura siguiente.



(A)

(B)

Figura 23- Bloque que representa la antena transmisora del sistema SAT.

3.3. Cadena RX

En el diseño del sistema en ADS, la cadena RX es vista como una “caja negra” que, al igual que la cadena TX, posee:

- Una entrada, por la que accede la señal principal que contiene la información a enviar.
- Una salida, por la cual ha de salir la señal principal tras ser modificada en la cadena.
- Dos entradas por las cuales acceden las señales procedentes de los dos osciladores locales.

En la figura siguiente se muestra dicho bloque.

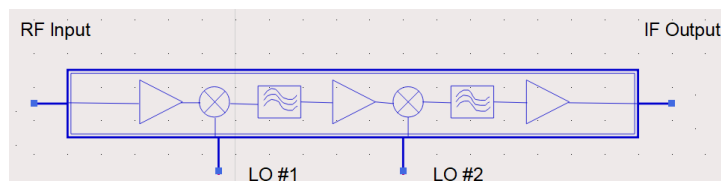
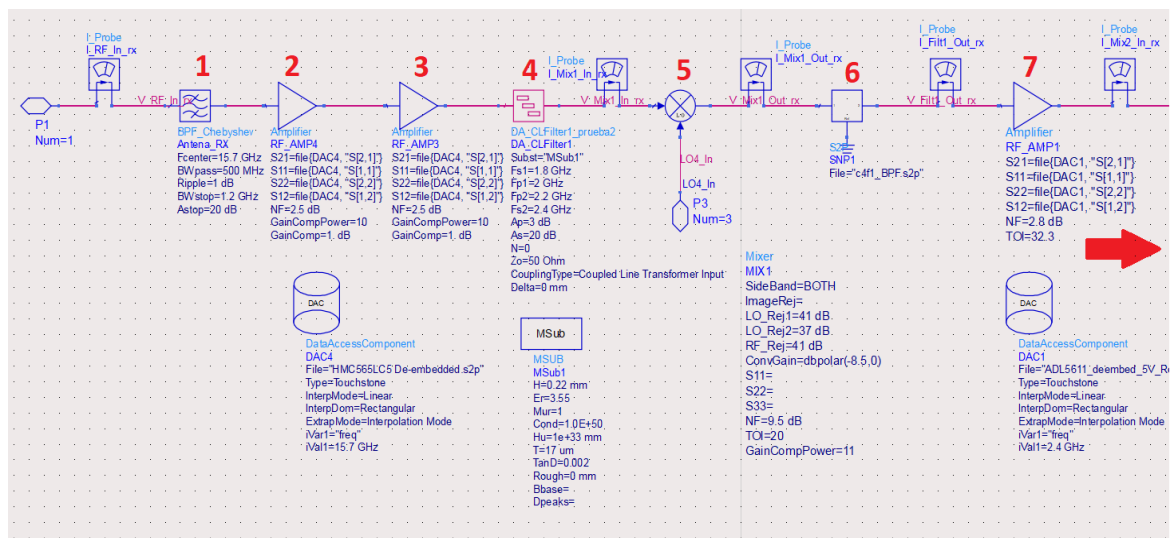
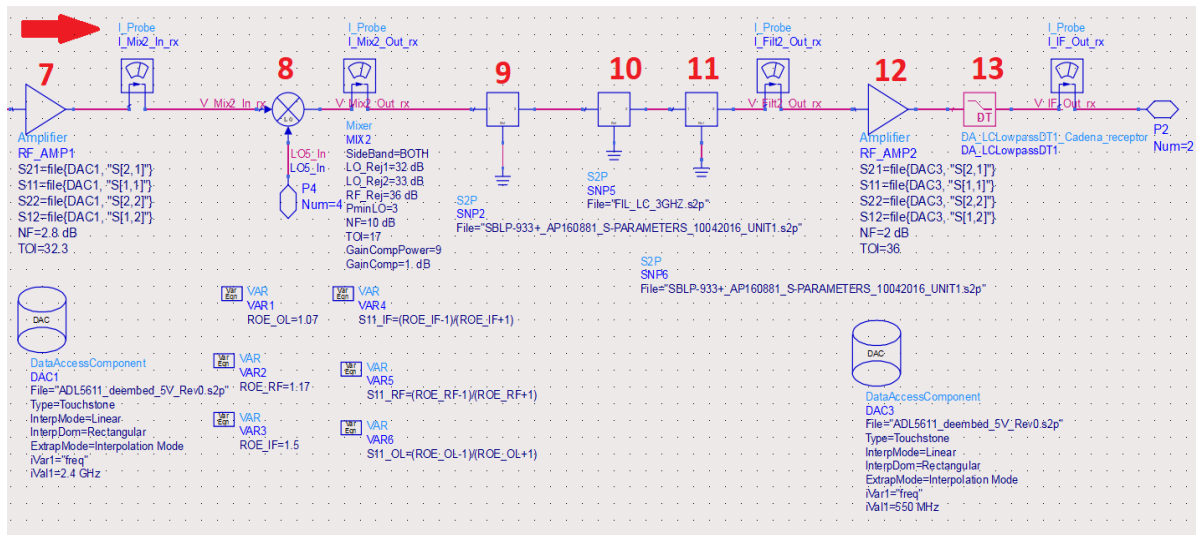


Figura 24-Bloque de ADS correspondiente con la cadena RX.

A continuación, se muestra el esquemático completo correspondiente a la cadena RX, es decir, los elementos internos que componen el bloque mostrado en la figura anterior, desde la entrada de la señal principal hasta su salida.



(A)



(B)

Figura 25- Esquemático de la cadena RX. (A) Desde el 1º componente hasta el 7º. (B) Desde el 7º componente hasta el 13º.

1. Filtro Chebyshev Antena RX

Es el primer componente que se observa en la cadena RX. Se trata de un bloque de ADS que representa un filtro paso banda Chebyshev con $f_c=15.7$ GHz y $BW=500$ MHz. Este filtro permite configurar la banda a la entrada de modo que no reciba otras señales que pudiesen saturar el LNA. Si la antenna tuviese una banda lo suficientemente estrecha se podría eliminar no siendo necesaria la actuación del filtro. Se trata de un filtro con las mismas características que el utilizado a la entrada del SAT.

En la figura siguiente se muestra el bloque que representa dicho filtro.

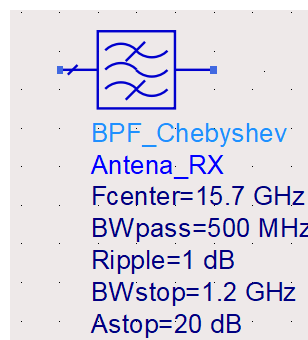


Figura 26- Bloque que representa la antena receptora del sistema RX.

2. y 3. Amplificadores HMC545LC5

Los siguientes componentes de la cadena son dos amplificadores HMC545LC5 de Analog, los cuales son los mismos que los de la cadena TX y SAT, y su representación es la misma.

4. RX Filter

El siguiente componente de la cadena es un filtro paso banda. Se trata del mismo filtro con $f_c=15.7$ GHz usado en la cadena del satélite, por lo que su representación y modelado es el mismo.

5. Amplificador ADL5611 (primero)

El siguiente bloque corresponde con el amplificador ADL5611 de Analog Devices, cuya representación y modelado es similar al de la cadena TX, y fue descrito en la sección correspondiente.

6. Mezclador HMC554A

El siguiente componente de la cadena es el mezclador HMC554A. Es el mismo que se usa en la TX-Box y que ya ha sido previamente descrita su representación y modelado en ADS.

7. Filtro c4f1 BPF

El siguiente componente corresponde con el filtro paso banda no comercial existente en el laboratorio. Su representación y modelado fue descrito en la cadena TX.

8. Mezclador SYM-30DLHW

Es el siguiente elemento de la cadena. Se trata del mismo mezclador que se usa en la cadena TX del fabricante Minicircuits, pero en modo downconverter. En las simulaciones es representado tomando como referencia algunos parámetros del datasheet del fabricante.

9 y 10. Filtros SBLP-933

Los siguientes dos bloques en serie representan el modelo de filtro paso bajo SBLP-933 de Minicircuits. Para su representación en ADS se emplea el fichero de

parámetros S facilitado por el fabricante. Los bloques correspondientes con dicho componente se muestran en la figura siguiente.

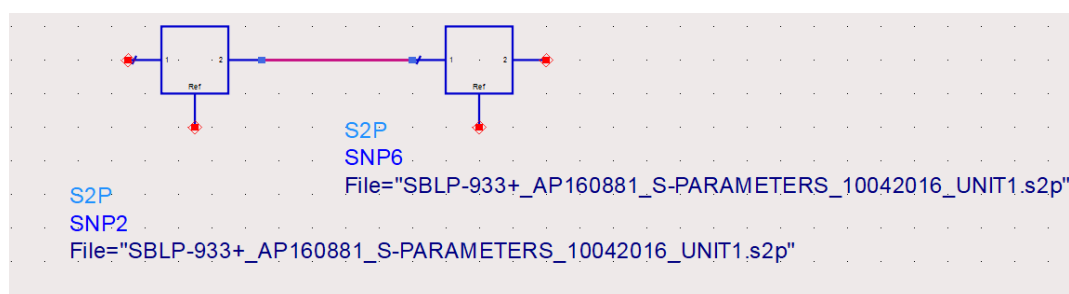
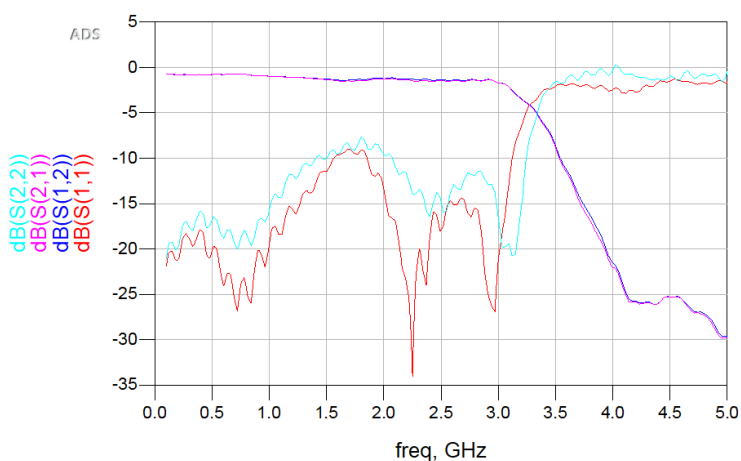
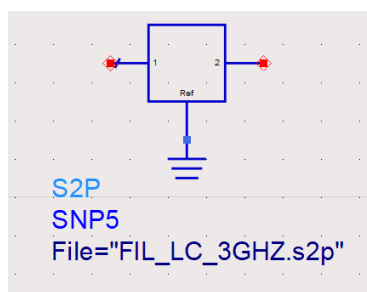


Figura 27--Bloque que representa el filtro SBLP-933 de la cadena RX.

11. Filtro LC 3GHz

El siguiente componente corresponde con un filtro paso bajo no comercial existente en el laboratorio del cual se conocen sus parámetros S, y son utilizados para su representación en ADS. En la siguiente imagen se muestra el bloque que representa dicho componente, así como sus parámetros S.



(A)

(B)

Figura 28-Bloque que representa el filtro no comercial de la cadena RX.

12. Amplificador ADL5611 (segundo)

El siguiente bloque corresponde con el amplificador ADL5611 de Analog Devices, cuya representación y modelado es similar al de la cadena TX, y fue descrito en la sección correspondiente.

13. Filtro paso bajo LC Cadena receptor

El último componente de la cadena corresponde con un filtro paso bajo diseñado en ADS basado en un circuito LC sencillo. El bloque que representa dicho filtro, así como el esquemático de bobinas y condensadores que lo forman se muestran en la figura siguiente.

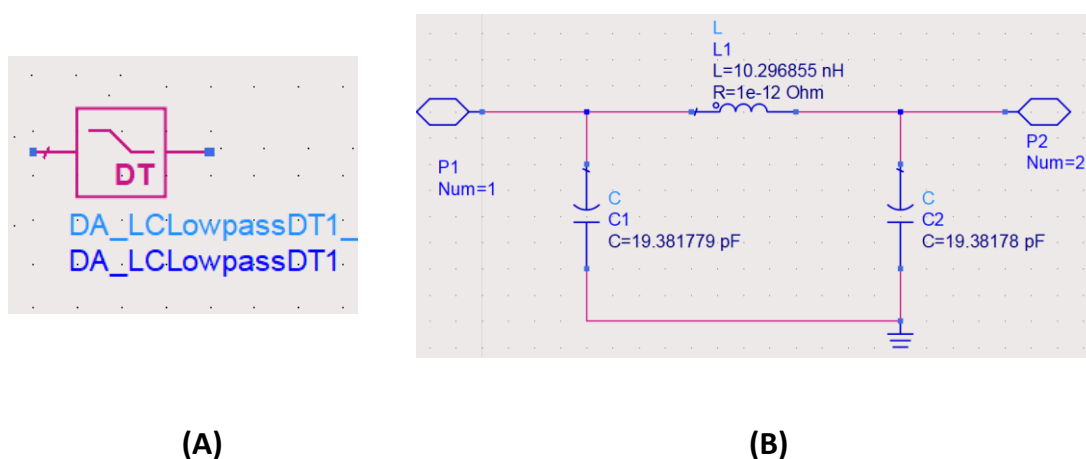


Figura 29-Filtro LC sencillo diseñado en ADS al final de la cadena RX.

Los parámetros S de este filtro se muestran en la figura siguiente.

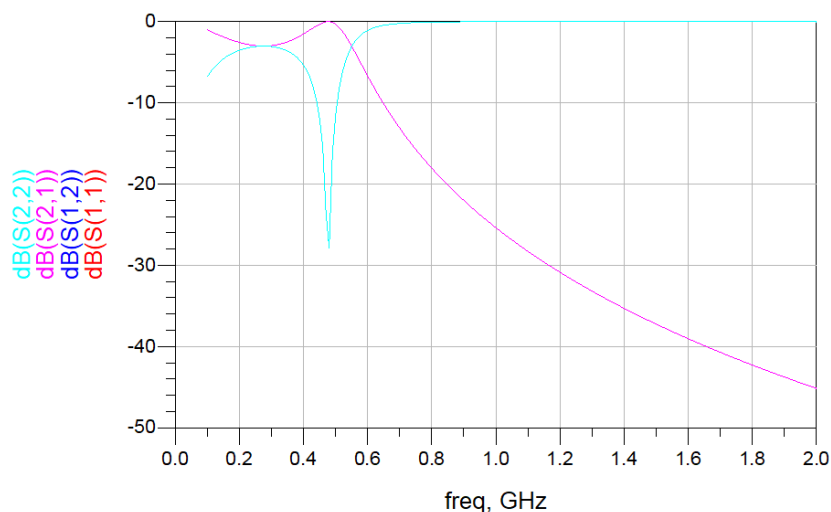


Figura 30-Parámetros S del filtro LC diseñado en la cadena RX.

3.4. Resultados de las simulaciones

Para llevar a cabo las simulaciones, se ha definido en cada cadena una serie de nudos a la entrada y/o salida de algunos de los componentes más relevantes. Se muestran en la figura siguiente.

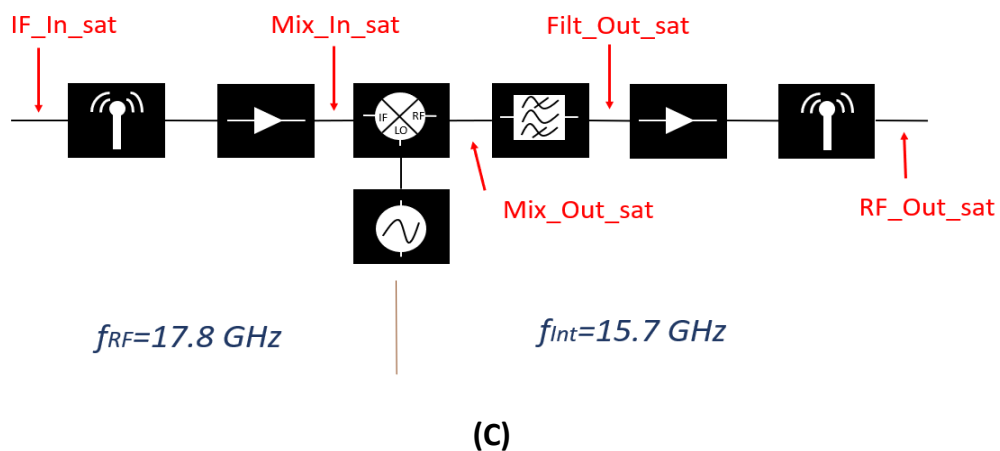
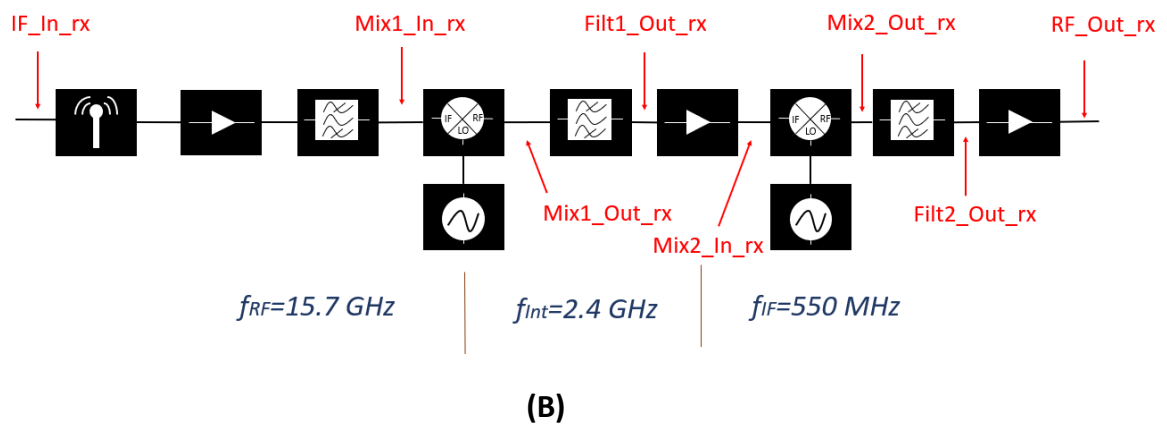
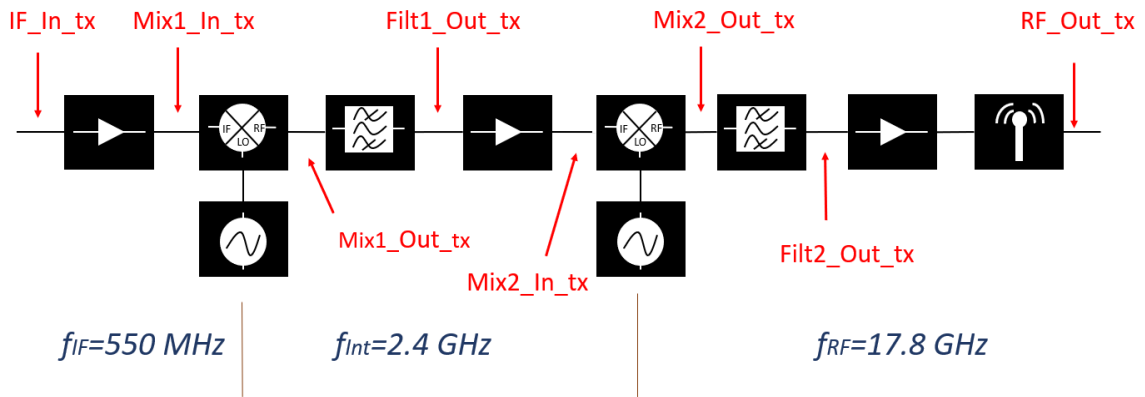


Figura 31-Correspondencia de los nudos en cada posición de la cadena. (A) De la cadena TX. (B) De la cadena RX. (C) De la cadena SAT.

Por otra parte, para unir las 3 cadenas se utilizan bloques atenuadores de ADS como el que se muestra en la figura siguiente. Estos bloques simulan las pérdidas, en el peor de los casos, entre los enlaces TX-SAT y SAT-RX.

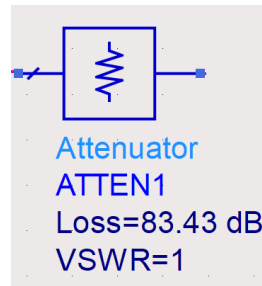


Figura 32-Bloque atenuador para simular las pérdidas de cada enlace.

Como se detalló en el capítulo 2, las pérdidas para el enlace TX-SAT son de 83.43 dB, mientras que para el enlace RX-SAT son de 82.33 dB.

Muchas de las simulaciones en ADS han consistido, entre otras cosas, en balances armónicos, en los cuales se asigna un nº a cada una de las frecuencias que se utiliza, como se muestra en la figura siguiente.

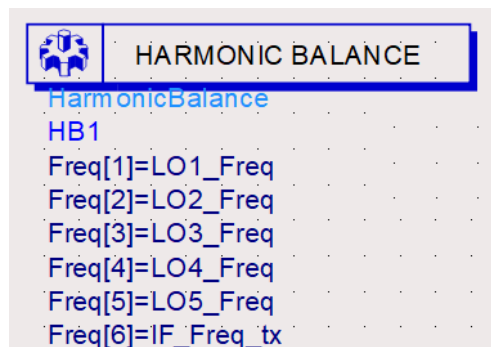


Figura 33-Asignación de frecuencias en el balance armónico

- **IF_Freq_tx** es la frecuencia inicial del sistema TX.
- **LO1_Freq** y **LO2_Freq** representan las frecuencias del primer y segundo oscilador del sistema TX, respectivamente.
- **LO3_Freq** representa la frecuencia del oscilador del sistema SAT.
- **LO4_Freq** y **LO5_Freq** representan las frecuencias del primer y segundo oscilador del sistema RX, respectivamente.

Esta forma de ordenar las frecuencias en el balance permite obtener los valores de intensidad y tensión para una frecuencia concreta. Por ejemplo, si se desea obtener el valor de tensión a la salida del satélite a la frecuencia en la que se

encuentra la portadora fundamental en ese punto, ha de definirse la orden como se muestra en la figura siguiente.

$$V_{IF_OUT_SAT}[1,1,-1,0,0,1]$$

Figura 34-Forma de obtener el valor de tensión a la salida del satélite a la frecuencia de la portadora fundamental de este punto.

Véase que la combinación [1,1,-1,0,0] representa la frecuencia resultante de LO1_Freq + LO2_Freq – LO3_Freq + IF_Freq_tx, es decir, la frecuencia de la portadora fundamental en ese nudo.

Así pues, basándose en esta explicación, tras simular el balance armónico. En numerosas ocasiones se calcula la potencia en cada nudo de la forma que se observa en la ecuación siguiente.

$$Pot. [Nodo IF_OUT_SAT] = 10 \log \left(\left| 0.5 \cdot \text{real} \left(V_{IF_OUT_SAT} : [1,1,-1,0,0,1] \cdot \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \text{conj} \left(I_{IF_OUT_SAT} [1,1,-1,0,0,1] \right) \right) \right| \right) + 30$$

[dBm]

Ecuación 4

3.4.1. Simulación de potencia y ganancia

La primera de las simulaciones realizadas ha consistido en obtener la potencia y ganancia de cada nodo. Para ello, se ha realizado una simulación de balance armónico de las 3 cadenas juntas, con las frecuencias de cada sistema.

En la figura siguiente se muestran las 3 cadenas unidas, así como los bloques conectados a cada entrada/salida.

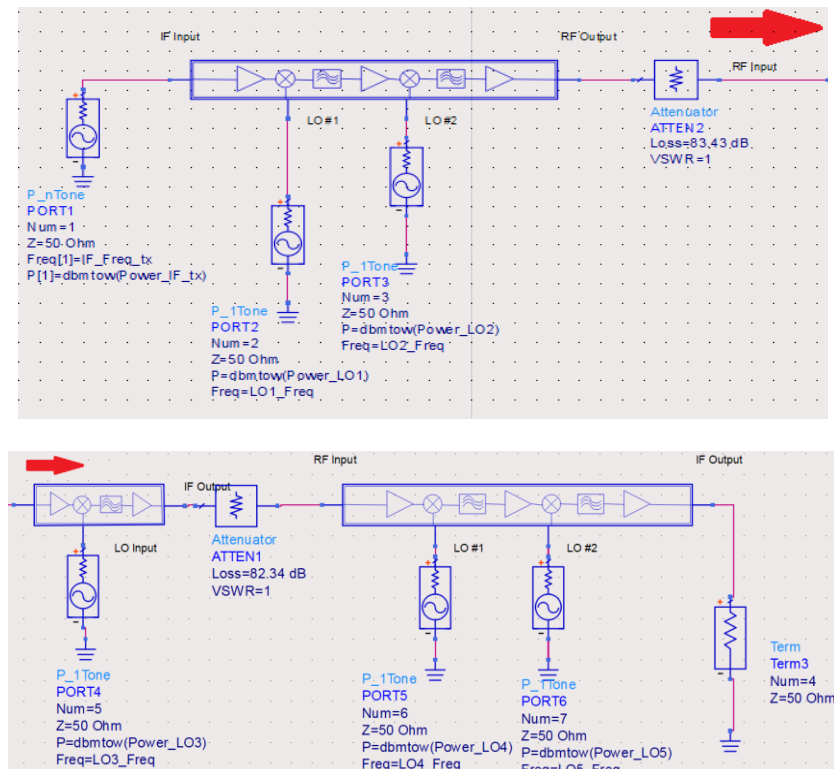


Figura 35-Esquemático de las 3 cadenas unidas con los bloques conectados de manera correspondiente a la simulación del balance armónico.

La potencia en cada nodo se ha calculado aplicando una ecuación que se observa simplificada en la ecuación siguiente.

$$Potencia[Nodo X] = 10 \times \log(|0.5 \times \text{real}(V[Nodo X] \times \text{conj}(I[Nodo X]))|) + 30$$

[dBm]

Ecuación 5

En el Anexo 1 de este documento se muestra el conjunto de ecuaciones que se han utilizado para llevar a cabo esta simulación de potencia.

Aplicando la ecuación mostrada anteriormente, se obtienen los siguientes resultados.

Potencia en Nodos del TX (dBm)							
IF_In_dBm_tx	Mix1_In_dBm_tx	Mix1_Out_dBm_tx	Filt1_Out_dBm_tx	Mix2_In_dBm_tx	Mix2_Out_dBm_tx	Filt2_Out_dBm_tx	RF_Out_dBm_tx
-60.053	-31.874	-39.419	-47.568	-26.461	-38.205	-38.740	2.348

Potencia en Nodos del SAT (dBm)				
RF_In_dBm_sat	Mix_In_dBm_sat	Filt_Out_dBm_sat	Mix_Out_dBm_sat	IF_Out_dBm_sat
-81.887	-40.684	-55.669	-55.134	-12.233

Potencia en Nodos del RX (dBm)							
RF_In_dBm_rx	Mix1_In_dBm_rx	Mix1_Out_dBm_rx	Filt1_Out_dBm_rx	Mix2_In_dBm_rx	Mix2_Out_dBm_rx	Filt2_Out_dBm_rx	IF_Out_dBm_rx
-94.775	-53.024	-62.219	-70.334	-49.447	-57.468	-59.581	-38.875

Figura 36-Resultados de las simulaciones de potencia en cada nodo

A la vista de los resultados se puede intuir el correcto funcionamiento de la simulación ya que la potencia aumenta al pasar por nodos con amplificadores y empeora tras pasar por otros componentes con pérdidas. También se observa la caída de potencia debido a los bloques atenuadores que simulan las pérdidas de cada enlace.

Cabe destacar que de esta gráfica se obtiene la ganancia de la TX-Box, RX-Box y MiniSAT para calcular los requerimientos de cada una.

Así pues, como a la entrada de la TX-Box se encuentra, en este caso, la señal Mix2_In_tx, la ganancia de este equipo es de 28.8 dB.

De la misma forma que en la TX-Box, como a la salida de la RX-Box se encuentra la señal Mix1_Out_rx, la ganancia de este equipo es de 32.6 dB.

Finalmente, la ganancia del MiniSAT es de 69.55 dB puesto que abarca toda la cadena.

Por otra parte, se ha simulado la ganancia de cada sistema mediante la siguiente ecuación, y se ha obtenido el resultado que se muestra en la figura siguiente.

$$Gan[Nodo X|sistema Y] = Pot.[Nodo X] - Pot.[Entrada sistema Y] \quad [dB]$$

donde sistema Y indica si el Nodo X pertenece al sistema TX, SAT o RX.

Ecuación 6

Ganancia de cada nodo respecto a la entrada del sistema TX (dB)

Gain_Mix1_In_tx	Gain_Mix1_Out_tx	Gain_Filt1_Out_tx	Gain_Mix2_In_tx	Gain_Mix2_Out_tx	Gain_Filt2_Out_tx
28.126	20.581	12.432	33.539	21.795	21.260

Ganancia de cada nodo respecto a la entrada del sistema SAT (dB)

Gain_Mix_In_sat	Gain_Mix_Out_sat	Gain_Filt_Out_sat
41.186	26.736	26.201

Ganancia de cada nodo respecto a la entrada del sistema RX (dB)

Gain_Mix1_In_rx	Gain_Mix1_Out_rx	Gain_Filt1_Out_rx	Gain_Mix2_In_rx	Gain_Mix2_Out_rx	Gain_Filt2_Out_rx
41.726	32.531	24.416	45.303	37.282	35.169

Ganancia de cada sistema(dB)

Gain_Sys_tx	Gain_Sys_sat	Gain_Sys_rx
62.348	69.637	55.875

Figura 37-Resultados de las simulaciones de ganancia en cada nodo

En el Anexo 1 de este documento se muestra el conjunto de ecuaciones que se han utilizado para llevar a cabo esta simulación de ganancia.

Tal y como se esperaba, la ganancia de cada sistema, como se puede ver en la figura anterior, es de 62.34, 69.64 y 55.88 dB, respectivamente. Estos valores de ganancia coinciden con la suma de valores de ganancia y pérdidas de los amplificadores, filtros y mezcladores de cada cadena.

Además, se puede observar cómo cada valor de ganancia coincide con la diferencia de potencia entre un nodo y el primero de cada sistema.

3.4.2. Simulación de figura de ruido.

Esta simulación se ha realizado en cada cadena por separado, puesto que, según la fórmula de Friis, que se muestra a continuación, si las 3 cadenas se encontrasen unidas, el efecto en la figura de ruido provocada por cada componente apenas sería relevante debido a los componentes del sistema SAT o RX.

$$F_{total} = F1 + \frac{F2 - 1}{G1} + \frac{F3 - 1}{G1 \times G2} + \frac{F4 - 1}{G1 \times G2 \times G3} \dots$$

Ecuación 7

Para llevar a cabo este análisis, se ha realizado una simulación del balance armónico y del ruido no lineal en cada nodo, teniendo en cuenta las frecuencias de cada sistema. En la siguiente figura se muestra cómo se han conectado el bloque que representa a la cadena TX.

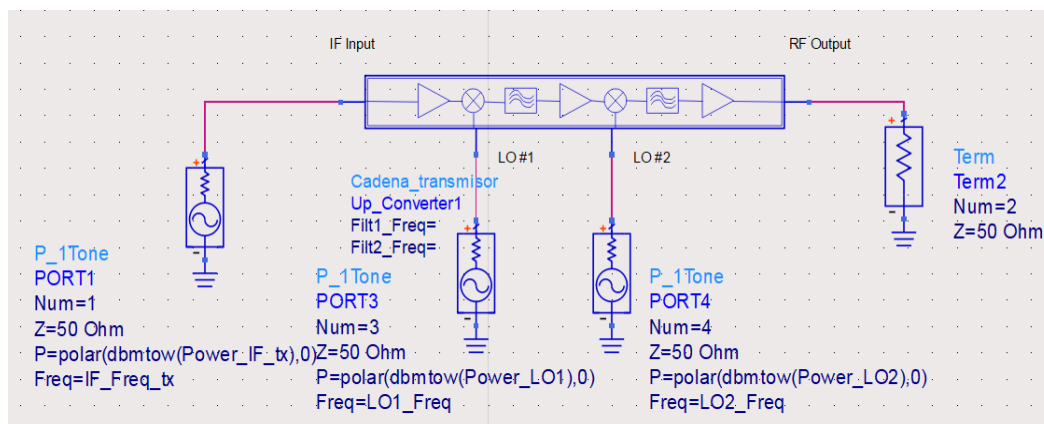


Figura 38- Esquemático del bloque TX con los elementos conectados de manera correspondiente a la simulación del balance armónico.

De la misma forma, en la figura siguiente se observa el esquemático correspondiente al satélite y los bloques conectados a él.

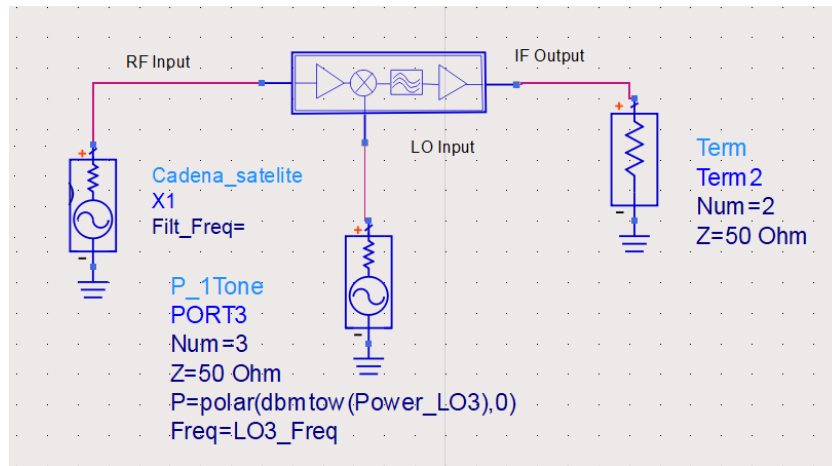


Figura 39-Esquemático del bloque SAT con los elementos conectados de manera correspondiente a la simulación del balance armónico.

Por último, en la siguiente figura se muestra cómo se han conectado el bloque que representa a la cadena RX.

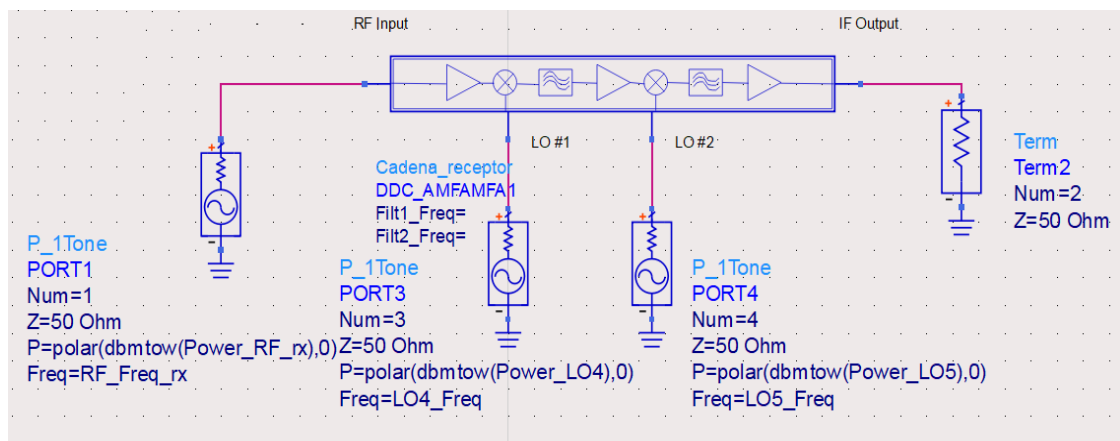


Figura 40-Esquemático del bloque RX con los elementos conectados de manera correspondiente a la simulación del balance armónico.

De estos bloques se ha simulado la figura de ruido para un ancho de banda de ruido de 1 Hz. Esto se debe a que son simulaciones de balance armónico y, por lo tanto, se puede considerar que la señal, al tratarse de portadoras, no tiene ancho de banda (se puede ver como si su ancho de banda es 1 Hz).

Con los resultados de esta simulación, se ha obtenido el nivel de voltaje del ruido en cada nudo, además del nivel de voltaje e intensidad de cada nudo.

Con estos valores, la ecuación simplificada que se muestra a continuación y las ecuaciones utilizadas en la simulación de potencia y ganancia, se ha calculado la figura de ruido.

$$NF [Nodo X] = 10 \log \left(\frac{\frac{Vn[Nodo X]^2}{Z[Nodo X]}}{KTBG[Del sistema en el Nodo X]} \right) [dB]$$

donde $Vn[Nodo X]$ es la tensión del ruido en el nodo X , Z es el voltaje de ese nodo entre la intensidad que pasa por ese nodo, K es la constante de Boltzmann, T son 290K, B es el ancho de banda del ruido y G es la ganancia de la señal en ese nudo respecto de la entrada al sistema.

Ecuación 8

En el Anexo 2 de este documento se muestra el conjunto de ecuaciones que se han utilizado para llevar a cabo esta simulación de figura de ruido.

En la figura siguiente, se muestran los resultados de los cálculos efectuados.

Figura ruido cadena TX(dB)

NF_Mix1_In_tx	NF_Mix1_Out_tx	NF_Filt1_Out_tx	NF_Mix2_In_tx	NF_Mix2_Out_tx	NF_Filt2_Out_tx	NF_Sys_tx
2.600	5.624	5.663	5.696	5.883	5.883	5.883

Figura de ruido cadena SAT (dB)

NF_Mix_In_sat	NF_Mix_Out_sat	NF_Filt_Out_sat	NF_Sys_sat
2.528	4.235	4.236	4.236

Figura de ruido cadena RX (dB)

NF_Mix1_In_rx	NF_Mix1_Out_rx	NF_Filt1_Out_rx	NF_Mix2_In_rx	NF_Mix2_Out_rx	NF_Filt2_Out_rx	NF_Sys_rx
2.521	2.525	2.532	2.540	2.550	2.550	2.550

Figura 41-Figura de ruido de las 3 cadenas por separado.

En la figura anterior se observa que la figura de ruido de los sistemas da valores que entran dentro de lo esperado puesto que:

- La figura de ruido de la cadena TX está condicionada, principalmente, por el efecto del primer componente de la cadena (amplificador de $NF=2.6\text{dB}$), así como del mezclador siguiente. Además, al no tener un filtro de rechazo de frecuencia imagen antes del mezclador (como en la cadena RX), se produce ese salto de 3 dB en el segundo nudo.
- La figura de ruido de la cadena SAT, está condicionada por los dos LNA en serie de la entrada. Sin embargo, se aprecia un salto en la figura de ruido a la salida del primer mezclador, puesto que éste tiene una $NF=12.8\text{ dB}$. Igualmente, al no tener un filtro de rechazo de frecuencia imagen antes del mezclador, se produce ese salto de 3 dB.
- La figura de ruido de la cadena RX se observa que es más baja que en el resto de las cadenas. Esto se debe a que, en la entrada del receptor, se encuentran dos LNA en cascada, así como otro filtro de rechazo de frecuencia imagen antes de llegar al mezclador. Además, ese primer mezclador tiene una figura de ruido relativamente baja.

3.4.3. Simulación de ganancia de compresión

Se ha simulado la ganancia de compresión del sistema TX-SAT-RX. Para ello, se han simulado las 3 cadenas juntas a través del mismo esquemático utilizado para calcular la potencia y ganancia del sistema.

La simulación realizada ha consistido en un balance armónico junto con un barrido de potencia en ese balance asignando un número a cada una de las frecuencias utilizadas, como se explicó anteriormente.

En el Anexo 3 se muestran las ecuaciones realizadas para cada nodo.

En la figura siguiente se puede observar la variación de la ganancia del sistema completo en función de la potencia aplicada a la entrada del transmisor. Esta simulación resulta muy útil para fijar unos requerimientos de potencia máxima de entrada en la TX-Box.

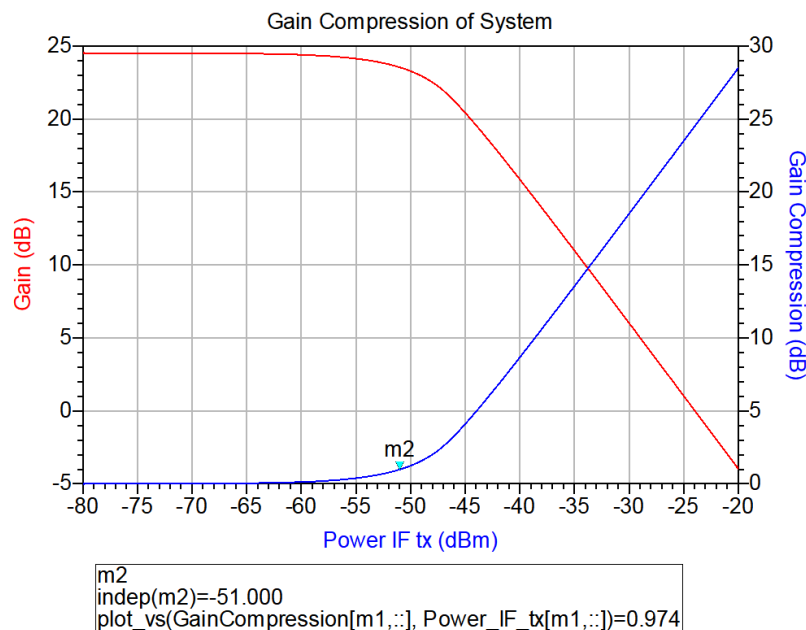


Figura 42-Ganancia de compresión del sistema TX-SAT-RX.

A la vista de estos datos, se concluye la potencia máxima recomendable que se puede aplicar al transmisor es de -51 dBm, puesto que es la potencia que coincide con el P1dB del sistema. Esto significa que la potencia de entrada máxima recomendable en la TX-Box es de -17.4 dBm.

En la figura siguiente, se muestra la curva de compresión de cada nodo del sistema TX, que permite hacerse a la idea de cual dónde se encuentra primer componente determinante en dicha ganancia de compresión.

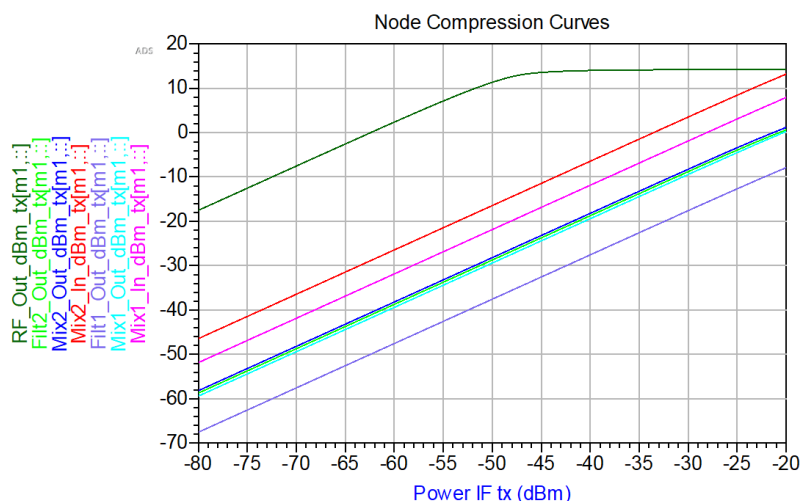
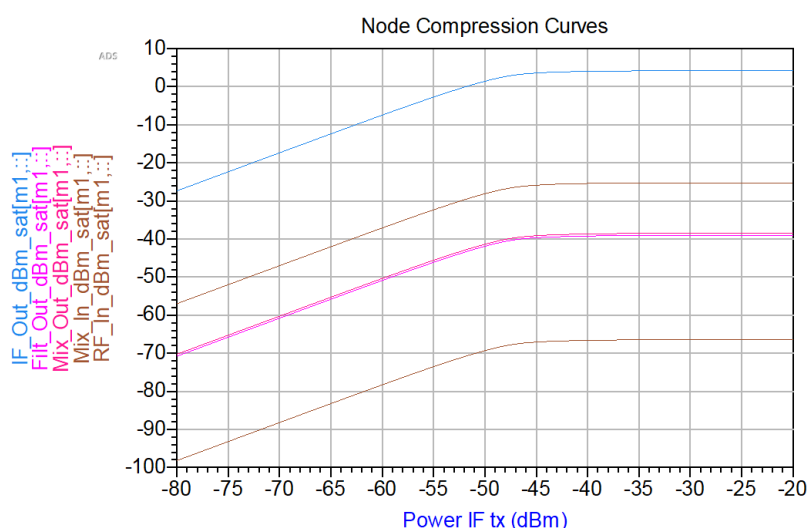


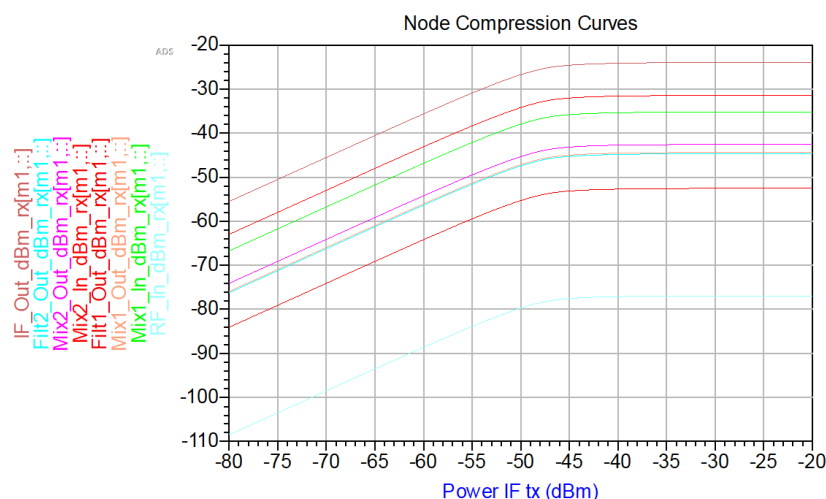
Figura 43-Curva de compresión de cada nodo en el sistema TX

Se observa que el primer componente que determina ganancia de compresión de este sistema es el último amplificador de la cadena TX. Es un resultado razonable teniendo en cuenta que coincide con el nodo con mayor potencia de todo el sistema TX-SAT-RX, y que la ganancia de compresión de dicho amplificador es de 11dB.

En la figura siguiente se muestra las curvas de compresión de cada nodo de los sistemas SAT y RX, condicionadas también por el efecto la cadena TX.



(A)



(B)

Figura 44-Curva de compresión de cada nodo. (A) En el sistema SAT. (B) En el sistema RX.

Se puede observar que las curvas de todos los nodos de las cadenas SAT y RX son similares a la curva del nodo correspondiente con la salida del último amplificador de la cadena TX. Esto se debe a que ningún componente de la cadena receptora o satélite está repercutiendo en el P1dB del sistema completo en mayor medida a como lo hace el último amplificador de la cadena TX.

Sin embargo, en caso de que se decidiese mejorar la ganancia de compresión únicamente sustituyendo el último amplificador del sistema transmisor por otro con un P1dB más alto, es posible que no se solucionase el problema. Esto se debe a que existe la posibilidad de que haya otros componentes en las cadenas SAT o RX que estén limitando el P1dB de la misma forma a como lo está haciendo el último amplificador de la cadena del transmisor. Sin embargo, de la figura anterior solo se puede determinar el primer componente que lo limita.

3.4.4. Simulación TOI y CIMD

Se ha simulado el punto de intercepción de 3º orden (TOI o IP3), así como la relación portadora intermodulación de los tres sistemas por separado. Para ello, se han realizado dos simulaciones de balance armónico. La primera de ellas para una potencia de entrada en las cadenas TX, SAT y RX de -80, -90 y -99 dBm. Mediante esta potencia de entrada, al encontrarse en pequeña señal, se permite obtener el TOI. También se aportan datos del CIMD para esa potencia. Sin embargo, resulta más interesante calcular el CIMD para las potencias de entrada que se usan en la realidad (-60, -82 y -95 dBm, respectivamente), pues permite hacerse a la idea de los espurios que se generan.

Para calcular el TOI, se ha simulado en el balance armónico, además de las frecuencias del sistema, dos tonos a la frecuencia de entrada de cada sistema con una separación entre uno y otro de $F_Spacing=100$ KHz, como se muestra en la figura siguiente.

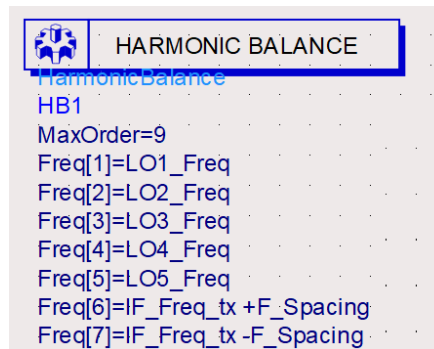


Figura 45-Asignación de frecuencias en el balance armónico

Cabe destacar que, para que la simulación de balance armónico funcionase correctamente, ha sido necesario modificar el valor de las frecuencias de los osciladores unos pocos hercios. Esto se debe a que el software no es capaz de distinguir los armónicos que proceden de una combinación de frecuencias de otros que se encuentren en esa misma frecuencia siendo resultado de otra combinación.

Así pues, antes de realizar la simulación de balance armónico, ha sido necesario modificar el valor de frecuencias de los índices de tal forma que se asegure que ninguna combinación posible de frecuencias da como resultado una frecuencia que pueda ser también obtenida mediante otra combinación de frecuencias diferente.

De forma teórica, el TOI puede ser calculado mediante dos tonos, f_1 y f_2 , obteniendo la potencia a la frecuencia f_1 , y la potencia de la combinación $2f_1 - f_2$. Con estas potencias obtenidas, el TOI y CIMD vienen dados por las ecuaciones siguientes.

$$TOI = 1.5 \cdot Potencia(dBm)[f1] - 0.5 \cdot Potencia(dBm)[2f1 - f2] \text{ [dBm]}$$

Ecuación 9

$$CIMD = Potencia(dBm)[f1] - Potencia(dBm)[2f1 - f2] \text{ [dBc]}$$

Ecuación 10

En este caso, para obtener el TOI en cada uno de los nudos, es necesario obtener dichas potencias teniendo en cuenta la frecuencia de la portadora fundamental de cada nudo. En las dos siguientes ecuaciones se muestra el cálculo de ambas potencias para en el nudo que corresponde con la salida del satélite.

$$Pot.[Nodo IF_OUT_SAT] = 10 \log \left(\left| 0.5 \cdot real \left(V_{IF_OUT_SAT} : [1,1, -1,0,0,1,0] \cdot conj(I_{IF_OUT_SAT}[1,1, -1,0,0,1,0]) \right) \right| \right) + 30 \text{ [dBm]}$$

Ecuación 11

$$Pot.[Nodo IF_OUT_SAT] = 10 \log \left(\left| 0.5 \cdot real \left(V_{IF_OUT_SAT} : [1,1, -1,0,0,2, -1] \cdot conj(I_{IF_OUT_SAT}[1,1, -1,0,0,2, -1]) \right) \right| \right) + 30 \text{ [dBm]}$$

Ecuación 12

De las ecuaciones anteriores, obsérvese que las combinaciones de frecuencias [1,1,-1,0,0,1,0] y [1,1,-1,0,0,2,-1] se pueden identificar con el armónico de primer orden f1 y el armónico de 3º orden 2f1-f2, respecto de la teoría explicada anteriormente.

En el Anexo 4 de este documento se muestran todas las ecuaciones realizadas para calcular el TOI y CIMD de cada nudo en pequeña señal.

Así pues, los resultados de la figura siguiente muestran el TOI y CIMD en el sistema TX para una potencia de entrada en la cadena TX de -80 dBm.

3rd Order Intercept Point (dBm)

Mix1_In_TOI_tx	Mix1_Out_TOI_tx	Filt1_Out_TOI_tx	Mix2_In_TOI_tx	Mix2_Out_TOI_tx	Filt2_Out_TOI_tx	RF_Out_TOI_tx
40.305	34.244	30.170	40.486	33.180	33.359	20.037

Carrier to Intermodulation (dBc)

Mix1_In_CIMD_tx	Mix1_Out_CIMD_tx	Filt1_Out_CIMD_tx	Mix2_In_CIMD_tx	Mix2_Out_CIMD_tx	Filt2_Out_CIMD_tx	RF_Out_CIMD_tx
112.483	107.907	107.908	107.434	104.566	105.460	98.254

Figura 46-Resultados de la simulación del TOI y CIMD de la cadena TX para una potencia de entrada en la cadena TX de -80 dBm.

En la figura siguiente se muestran los resultados de la simulación del TOI y CIMD del sistema SAT para una potencia de entrada en la cadena SAT de -90 dBm.

3rd Order Intercept Point (dBm)

RF_In_TOI_sat	Mix_In_TOI_sat	Mix_Out_TOI_sat	Filt_Out_TOI_sat	IF_Out_TOI_sat
12.830	20.594	2.307	1.767	20.604

Carrier to Intermodulation (dBc)

RF_In_CIMD_sat	Mix_In_CIMD_sat	Mix_Out_CIMD_sat	Filt_Out_CIMD_sat	IF_Out_CIMD_sat
225.224	158.345	153.470	153.460	104.276

Figura 47-Resultados de la simulación del TOI y CIMD de la cadena SAT para una potencia de entrada en la cadena SAT de -90 dBm.

Por último, en la figura siguiente se muestran los resultados de la simulación del TOI y CIMD del sistema RX para una potencia de entrada en la cadena SAT de -90 dBm.

3rd Order Intercept Point (dBm)

Mix1_In_TOI_rx	Mix1_Out_TOI_rx	Filt1_Out_TOI_rx	Mix2_In_TOI_rx	Mix2_Out_TOI_rx	Filt2_Out_TOI_rx	IF_Out_TOI_rx
19.020	7.278	-0.869	19.975	8.355	6.389	26.096

Carrier to Intermodulation (dBc)

Mix1_In_CIMD_rx	Mix1_Out_CIMD_rx	Filt1_Out_CIMD_rx	Mix2_In_CIMD_rx	Mix2_Out_CIMD_rx	Filt2_Out_CIMD_rx	IF_Out_CIMD_rx
134.888	129.792	129.791	129.264	127.792	128.094	126.135

Figura 48-Resultados de la simulación del TOI y CIMD de la cadena RX para una potencia de entrada en la cadena RX de -99 dBm.

A la vista de los resultados, se puede concluir que los productos de intermodulación de 3º orden en los nudos de cada sistema no suponen un problema grave puesto que el valor del TOI en cada nodo se encuentra muy por encima de la potencia de la portadora fundamental.

Cabe destacar que estas medidas se hacen en pequeña señal para asegurarse de no estar en saturación y que el punto de intersección de las rectas analizadas (1º y 3º orden) corresponden con el TOI.

Por otra parte, como resulta más interesante observar el CIMD para potencias reales de trabajo, se muestran en la figura siguiente para potencias de -60, -82 y -95 dBm, respectivamente.

Carrier to Intermodulation (dBc)						
Mix1_In_CIMD_tx	Mix1_Out_CIMD_tx	Filt1_Out_CIMD_tx	Mix2_In_CIMD_tx	Mix2_Out_CIMD_tx	Filt2_Out_CIMD_tx	RF_Out_CIMD_tx
136.483	131.907	131.908	131.434	131.583	134.571	62.235

Carrier to Intermodulation (dBc)				
RF_In_CIMD_sat	Mix_In_CIMD_sat	Mix_Out_CIMD_sat	Filt_Out_CIMD_sat	IF_Out_CIMD_sat
191.224	124.345	119.470	119.460	70.268

Carrier to Intermodulation (dBc)						
Mix1_In_CIMD_rx	Mix1_Out_CIMD_rx	Filt1_Out_CIMD_rx	Mix2_In_CIMD_rx	Mix2_Out_CIMD_rx	Filt2_Out_CIMD_rx	IF_Out_CIMD_rx
144.888	139.792	139.791	139.264	137.792	138.094	136.135

Figura 49-CIMD de las cadenas TX, SAT y RX para potencias de entrada de -60, -82 y -95 dBm.

3.4.5. Simulación Espurios

Para simular los espurios, se han unido las 3 cadenas y realizado un análisis del balance armónico a las diferentes frecuencias del sistema para una potencia de entrada en el sistema TX de -60 dBm. Posteriormente, se ha obtenido la potencia de cada portadora a la salida del sistema completo (salida de RX) y representado gráficamente. En la figura siguiente, se observa cada portadora a la salida en función de la frecuencia.

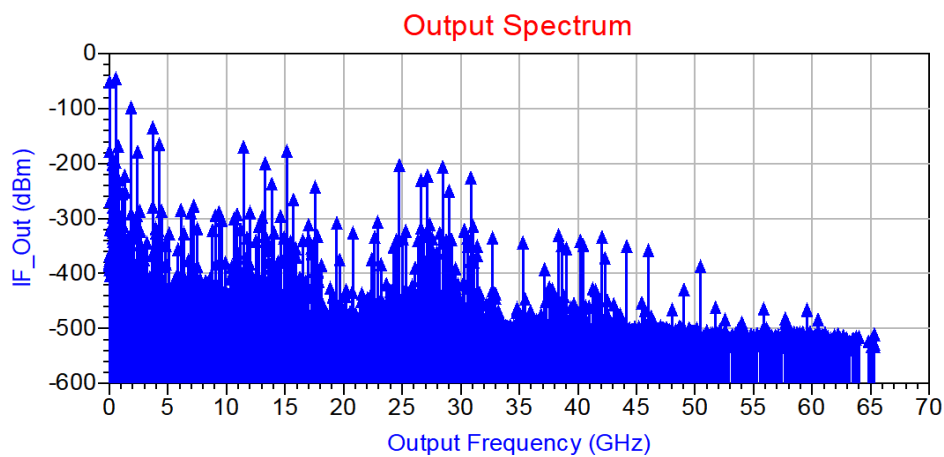


Figura 50-Nivel de potencia de cada portadora a la salida del sistema TX-SAT-RX para una potencia de entrada en la cadena RX de -60 dBm.

Para facilitar el análisis de los espurios, se ha calculado la diferencia de cada uno respecto de la portadora fundamental, utilizando la ecuación siguiente.

$$Spur_{Out} = IF_{Out [RX]} - IF_{Out portadora Fundamental[RX]}$$

Ecuación 13

El resultado de esta ecuación se recoge en una tabla, que se observa en la figura siguiente, de forma que la frecuencia fundamental es la portadora nº 77 (550 MHz).

IF_Out Spurs in Descending Order (dBc)

harminindex	Spur_Out_Matrix
77	0.000000
0	-6.07514
310	-52.7380
607	-89.0125
672	-119.427
107	-122.621
1695	-124.539
2275	-131.813
6	-132.491
380	-133.161
27	-147.434
60	-150.875
1982	-154.216
28	-156.292
3495	-157.471
3965	-161.099
225	-176.917

Figura 51-Nivel de potencia de cada portadora en referencia a la portadora fundamental.

El primer espurio que se encuentra es el nº0, que corresponde a la señal DC. Esto en la realidad no aparecería si se ponen condensadores de desacoplo. Por lo tanto, el primer espurio a tener en cuenta es el nº310 (1.852 GHz). Éste corresponde únicamente con la frecuencia del 2º oscilador de la cadena RX, y su existencia no es un problema grave pues su potencia es suficientemente baja.

3.4.6. Simulación LSSP

Se ha realizado una simulación de parámetros S en gran señal (LSSP) de las 3 cadenas por separado, con el fin de obtener algunos parámetros característicos del sistema como las pérdidas de retorno a la entrada y salida, o el retardo de grupo.

Para cadena TX, se ha configurado en el análisis una frecuencia de entrada por el puerto 1 de 550 MHz, y por el puerto 2 de 17.8 GHz. En la figura siguiente se observa el sistema TX con los bloques conectados para lleva a cabo la simulación.

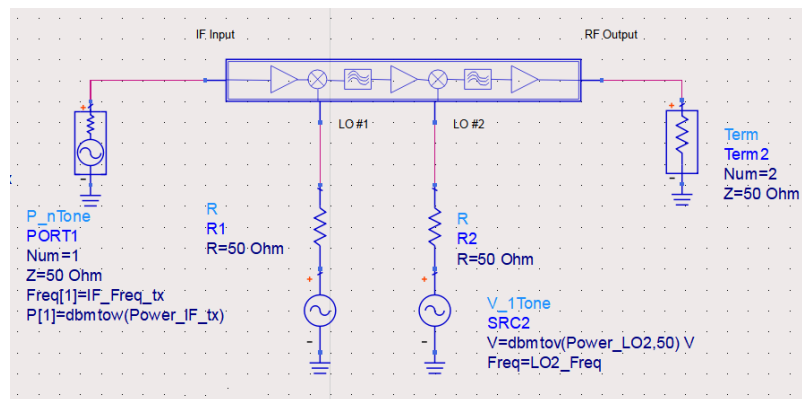


Figura 52-Esquemático correspondiente con la simulación LSSP del sistema TX.

Para obtener las pérdidas de retorno, se representan los parámetros S11 y S22 que corresponden a las pérdidas de retorno a la entrada y a la salida, respectivamente. En la figura siguiente se muestra, en función de la frecuencia de entrada en el sistema, ambas pérdidas de retorno.

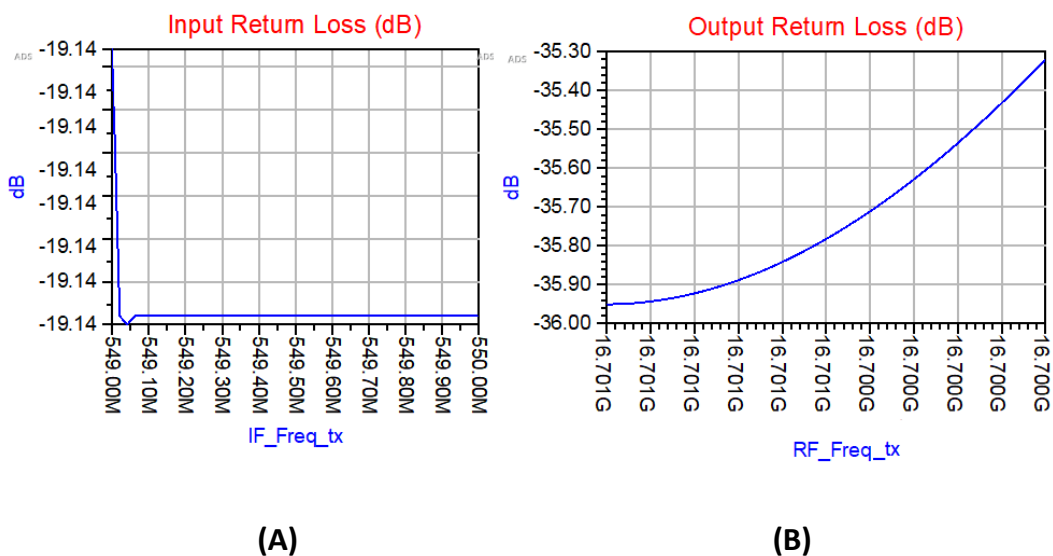


Figura 53-Pérdidas de retorno del sistema TX. (A) En la entrada. (B) En la salida.

De la figura anterior se puede concluir que las pérdidas de retorno del sistema TX no suponen un problema grave puesto que tienen un valor suficientemente bajo. Por otra parte, en la figura siguiente, se muestra el retardo de grupo en función de la frecuencia de entrada en el sistema TX.

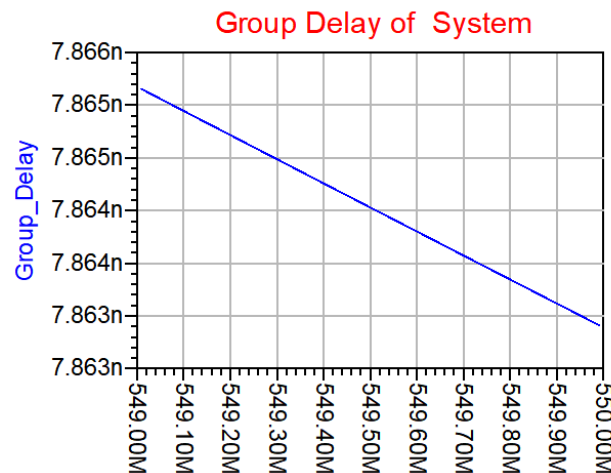


Figura 54-Retardo de grupo de la señal a lo largo del sistema TX.

Para las simulaciones en la cadena SAT, se ha diseñado el esquemático de la figura siguiente configurando en el análisis una frecuencia de entrada por el puerto 1 de 17.8 GHz, y por el puerto 2 de 15.7 GHz.

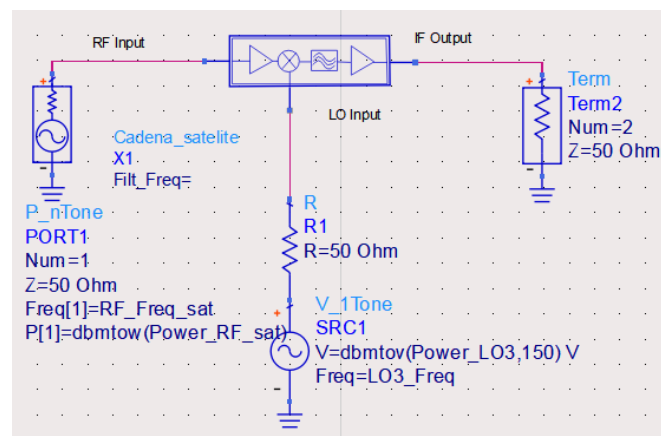


Figura 55-Esquemático correspondiente con la simulación LSSP del sistema SAT.

Las pérdidas de retorno de entrada y salida se simulan de la misma forma que con el sistema TX, y se muestran en la figura siguiente.

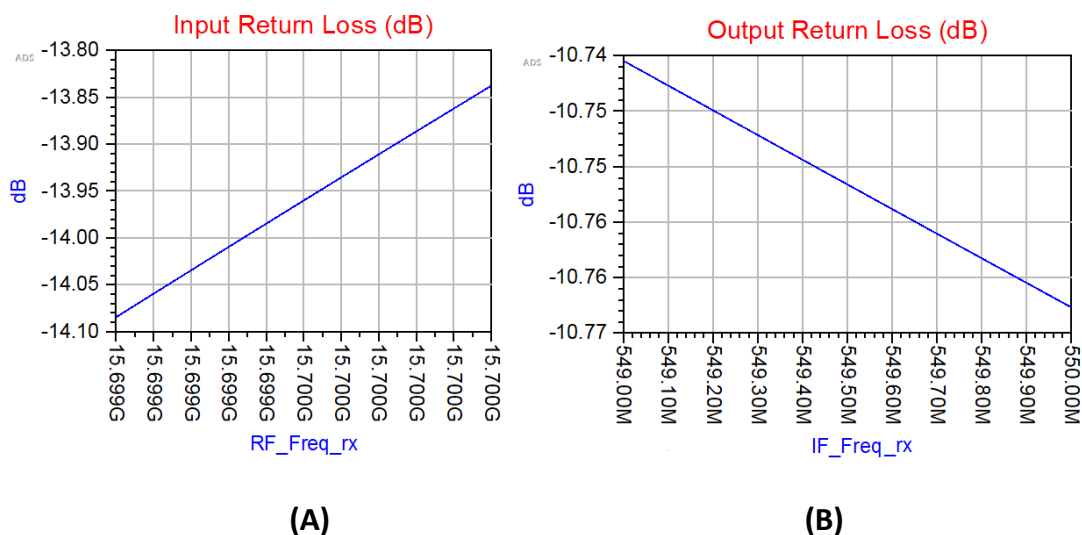


Figura 56-Pérdidas de retorno del sistema SAT. (A) En la entrada. (B) En la salida.

Por otra parte, en la figura siguiente, se muestra el retardo de grupo en función de la frecuencia de entrada en el sistema SAT.

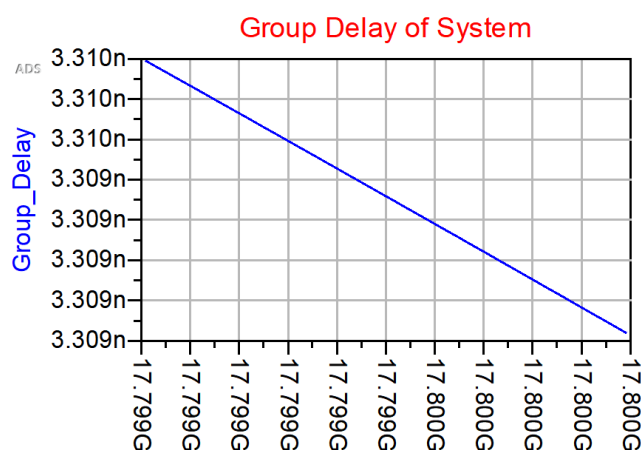


Figura 57-Retardo de grupo de la señal a lo largo del sistema SAT.

Por último, para las simulaciones en la cadena RX, se ha diseñado el esquemático de la figura siguiente configurando en el análisis una frecuencia de entrada por el puerto 1 de 15.7 GHz, y por el puerto 2 de 550 MHz.

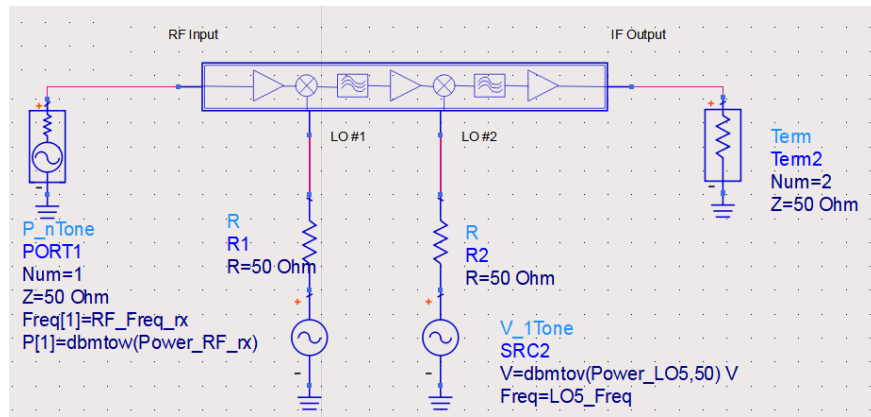


Figura 58--Esquemático correspondiente con la simulación LSSP del sistema RX.

Las pérdidas de retorno de entrada y salida se simulan de la misma forma que con los sistemas anteriores y se muestran en la figura siguiente.

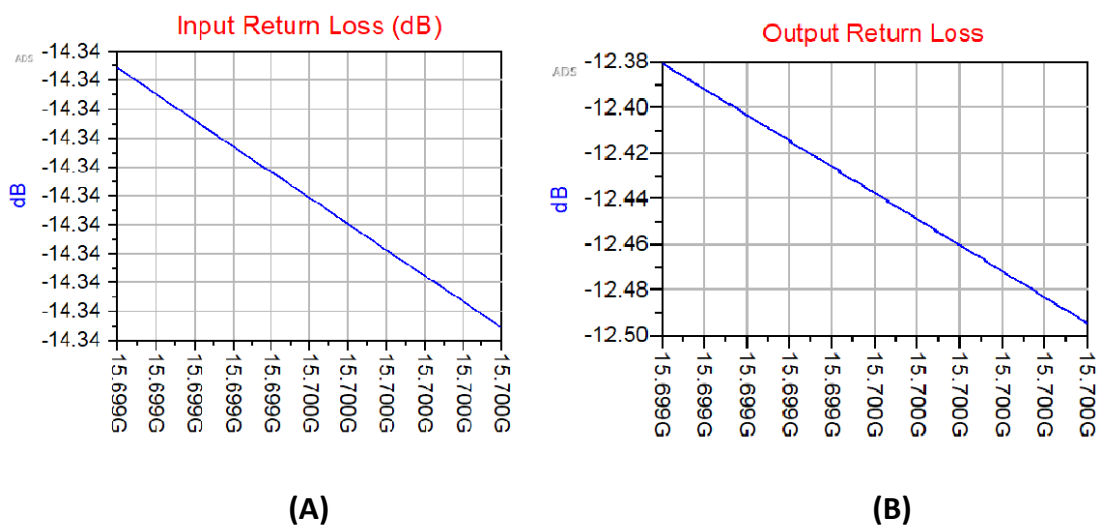


Figura 59--Pérdidas de retorno del sistema RX. (A) En la entrada. (B) En la salida.

Por último, en la figura siguiente, se muestra el retardo de grupo en función de la frecuencia de entrada en el sistema SAT.

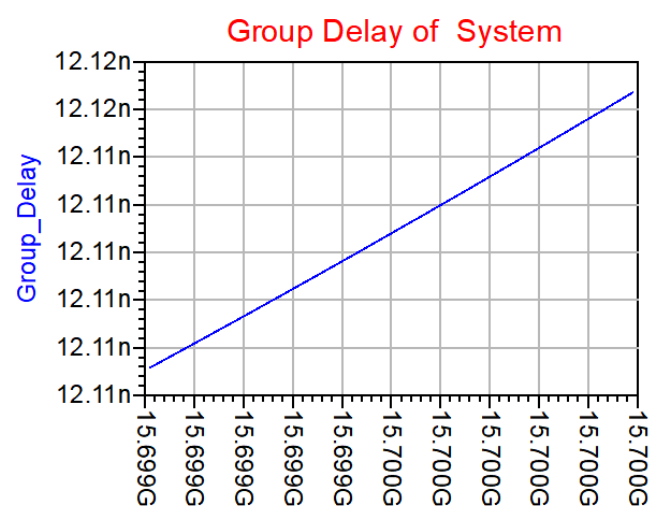


Figura 60-Retardo de grupo de la señal a lo largo del sistema RX.

3.4.7. Simulación CNR

Estas simulaciones han sido realizadas en cada cadena por separado. Para llevar a cabo este análisis, se ha realizado una simulación del balance armónico y del ruido no lineal en cada nodo de cada sistema teniendo en cuenta las frecuencias que lo engloban. Todo esto, aplicando una potencia de entrada en el sistema TX, SAT y RX de -60, -82 y 90 dBm, respectivamente. Estas potencias de entrada son las potencias reales del diseño. Por otra parte, el ancho de banda de ruido empleado es de 30 KHz.

Para obtener la CNR de cada nodo, se ha calculado la potencia de la portadora fundamental en cada nodo y dividido entre la potencia del ruido para ese mismo valor de frecuencia. Cabe destacar que al tratarse de una medida que relaciona la portadora con el ruido, esta simulación se ha hecho en pequeña señal.

En el Anexo 5 de este documento, se muestra el conjunto de ecuaciones realizadas para llevar a cabo este análisis.

En la figura siguiente se muestra la CNR obtenida para cada uno de los sistemas.

CNR en el sistema TX (dB)							
CNR_IF_In_tx	CNR_Mix1_In_tx	...R_Mix1_Out_tx	...R_Filt1_Out_tx	CNR_Mix2_In_tx	...R_Mix2_Out_tx	...R_Filt2_Out_tx	CNR_RF_Out_tx
68.765	65.855	49.678	49.675	49.673	49.554	49.554	49.652

CNR en el sistema SAT (dB)				
CNR_RF_In_sat	CNR_Mix_In_sat	CNR_Mix_Out_sat	CNR_Filt_Out_sat	CNR_IF_Out_sat
49.210	46.681	44.967	44.967	44.968

CNR en el sistema RX (dB)							
CNR_RF_In_rx	... Mix1_In_rx	...Mix1_Out_rx	... Filt1_Out_rx	... Mix2_In_rx	...Mix2_Out_rx	... Filt2_Out_rx	...R_IF_Out_rx
38.212	35.487	32.354	32.157	32.045	29.186	29.186	29.186

Figura 61-CNR de cada nodo de cada uno de los sistemas TX, SAT y RX, para unas potencias de entrada de -60, -82 y 90 dBm (potencias reales del diseño).

Capítulo 4: Sistema y equipos

Para que un emulador de una comunicación vía satélite en banda Ku se pueda llevar a cabo de forma real, es necesario, no solo comprobar su funcionamiento con simulaciones de radiofrecuencia, sino crear tanto la estructura de los equipos que albergarán los componentes como diseñar el sistema que se encargue de alimentar cada PCB de radiofrecuencia.

Por otra parte, como se ha explicado anteriormente, para llevar a cabo una emulación de una comunicación vía satélite se necesita un transmisor (sistema TX), un emulador de un satélite (sistema SAT) y un receptor (sistema RX). Por esta razón, es necesario crear 3 equipos diferentes. Cada uno con su propia “caja”, sistema de alimentación y PCB de radiofrecuencia.

Así pues, en este capítulo, se explica de forma detallada el diseño de la estructura o “caja” de los 3 equipos necesarios, así como su sistema de alimentación y PCB de radiofrecuencia, todo ello tratando de acercarse a la realidad teniendo en cuenta las medidas reales de los componentes y de los equipos.

4.1. Sistema TX

El sistema TX comprende el conjunto de componentes encargados de recibir la señal externa con una longitud de onda concreta, aumentarla en frecuencia a 17.8 GHz y transmitirla con una ganancia de 28.8 dB. Este sistema se compone de una caja “TX-Box” que alberga tanto la PCB de radiofrecuencia como la placa DC que alimenta a dicha PCB.

Para el correcto funcionamiento del sistema, la señal externa ha de entrar cumpliendo una serie de parámetros, que se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 1-Parámetros a cumplir de la señal de entrada a la TX-BOX

	<i>Valor máximo</i>	<i>Valor mínimo</i>	<i>Valor recomendado</i>
<i>Potencia entrada (dBm)</i>	-17.4	-30	-24.5
<i>Tensión alimentación (V)</i>	12	7.2	7.7
<i>Frecuencia (GHz)</i>	2.5	1.3	2.4

Además, la TX-Box ha de alimentarse mediante la señal DC que corresponda según la frecuencia de entrada, como se muestra en la figura siguiente.

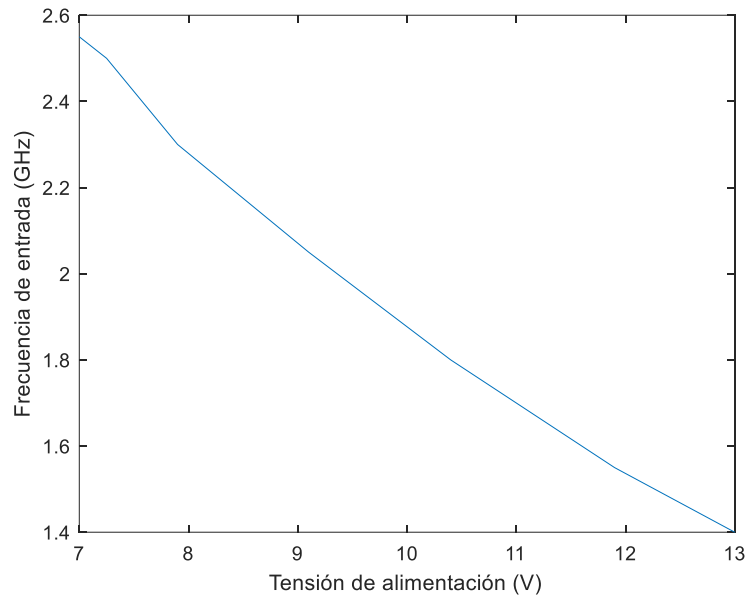


Figura 62-Tensión de alimentación de la TX-Box en función de la frecuencia de la señal de entrada

Cabe destacar que las simulaciones han sido realizadas tomando como referencia una señal de entrada de -21.5 dBm y 2.4 GHz, obteniendo a la salida una potencia de +7 dBm y 17.8 GHz. Para obtener esta transformación de señal, en la práctica, la TX-Box debe de ser alimentada a 7.7V.

La existencia de una limitación en el valor máximo de potencia de entrada es debido al valor del P1dB obtenido en las simulaciones del sistema, como se pudo ver en las simulaciones del capítulo anterior.

Por otra parte, la existencia de un valor máximo y mínimo de frecuencia de entrada está relacionado con la señal VTUNE del VCO de la PCB del TX-Box, así como de la tensión de entrada mínima a la cual funciona correctamente el regulador LM7805 de la placa de alimentación de la TX-Box.

En las secciones siguientes de este documento se detallará la caja del sistema TX, así como la placa de alimentación y PCB de radiofrecuencia.

4.1.1. Caja TX-Box

TX-Box es el nombre que recibe la caja en la que encuentran los componentes asociados a la transmisión desde la entrada a la frecuencia de 2,4 GHz hasta la salida a 17.8 GHz. Se puede ver como una caja “negra” con dos conectores SMA (uno para introducir la señal de entrada y otro de salida), y dos clavijas en la parte superior en las que conectar la alimentación. En la figura siguiente se observa dicha caja.

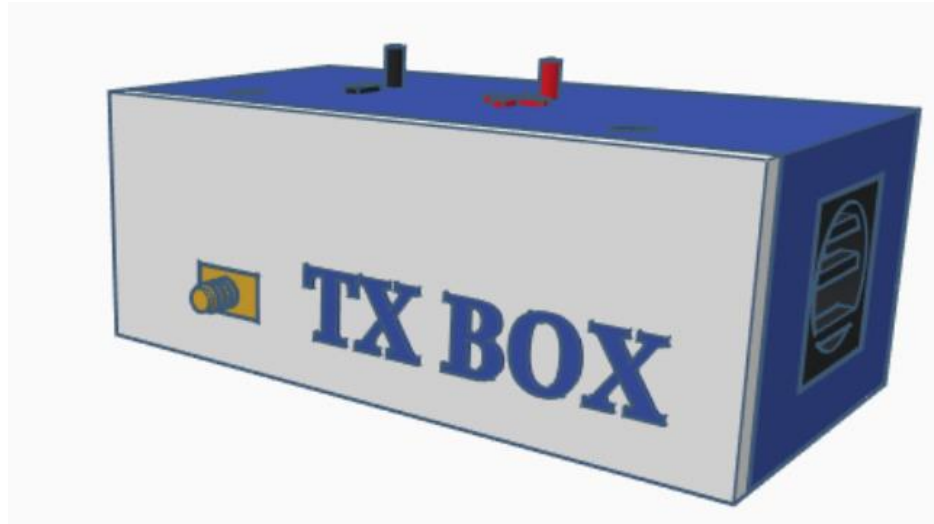
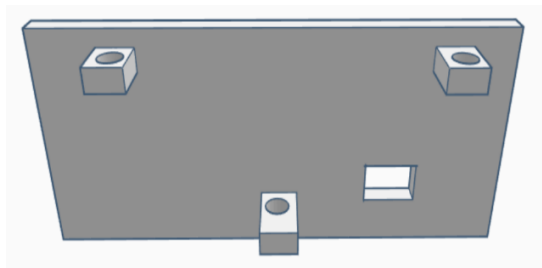
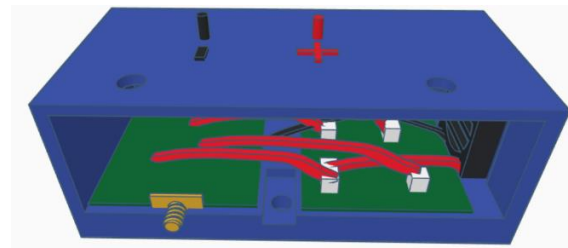


Figura 63- Dibujo en 3D de la TX-Box vista desde fuera

La caja posee una tapa lateral, para facilitar el montaje, que se encaja en la TX-Box mediante tornillos avellanados M3x8, así como una pegatina azul en la que aparece serigrafiado “TX-Box”. En la figura siguiente se muestran las dos partes que han de unirse.



(A)

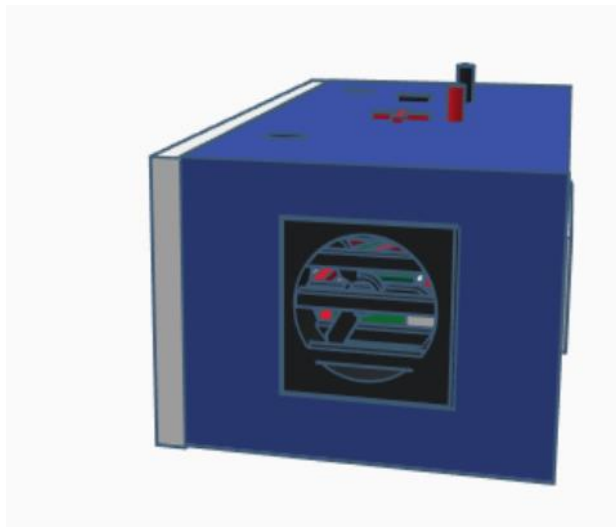


(B)

Figura 64-(A) Dibujo 3D de la parte interior de la tapa de la TX-Box. (B) TX-Box sin tapa

El material del que se compone tanto la estructura de la caja como la tapa lateral es acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), puesto que es apto para imprimirse en una impresora 3D y posee algunas ventajas frente a otros materiales como el PLA, como su baja deformidad a altas temperaturas. Cabe destacar que es un material no conductor.

En uno de los laterales, la TX-Box posee un ventilador 30x30x15 mm de Cablematic de 5V y 0.12A, que se muestra en la figura siguiente, y anclado a la TX-Box mediante tornillos.



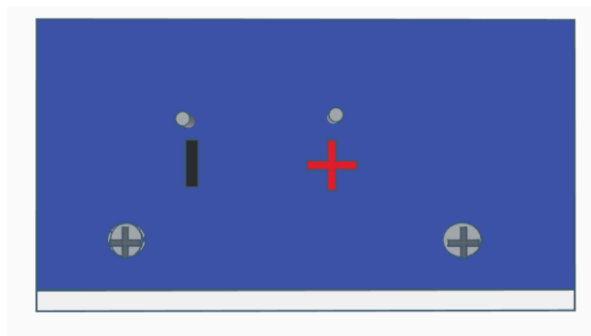
(A)



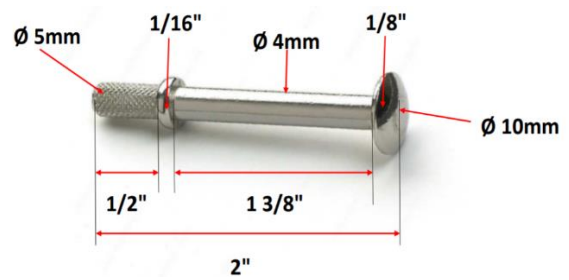
(B)

Figura 65-Ventilador de la TX-Box. (A) En el dibujo 3D. (B) Componente real de Cablematic

En la parte superior de la caja, posee dos clavijas para alimentar la TX-Box, como se muestra en la figura siguiente. Estas clavijas se fijan a la TX-Box con silicona. Dentro de la caja, se conectan mediante dos cables a la placa de alimentación.



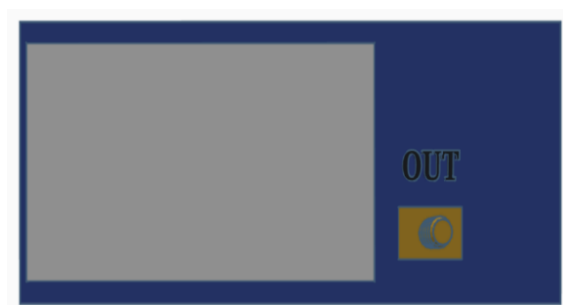
(A)



(B)

Figura 66- Clavijas de alimentación DC (A)Vistas desde la parte superior de la TX-Box en 3D.
(B) Componente real

En la parte trasera del TX-Box, posee una pegatina 6x3 cm en la que se muestra información y requerimiento de la caja, como se muestra en la figura siguiente.



(A)

TX BOX <small>Proyecto fin de máster José Bengoechea Cuadrado</small>			
INPUT	Valor máx	Valor min	Valor recom.
Pot. (dBm)	-15.5	-40	-24.5
Freq (GHz)	2.5	1.3	2.4
OUTPUT	Valor	Vcc (V)	Pot.IN (dBm)
Pot. (dBm)	[-13.5, 11]	7.7	-24.5
Freq (GHz)	17.8		

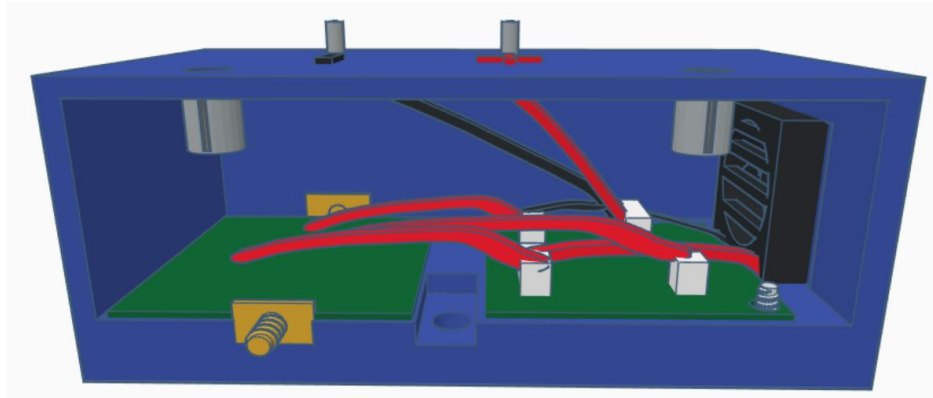
(B)

Figura 67-Pegatina con requerimientos de la TX-Box. (A) En la parte trasera del dibujo 3D.
(B) Diseño real.

Por último, la PCB de radiofrecuencia y la placa de alimentación se encuentran en el interior de la TX-Box apoyadas sobre la base en posición horizontal. Las medidas de ambas placas son 5x5cm. En las secciones siguientes se detallarán ambas placas.

La PCB RF queda sujeta a la caja mediante los dos conectores SMA y tornillos. Los conectores SMA se ajustan a la caja una vez hayan sido soldados en la PCB. Por otra parte, la alimentación DC queda fijada mediante dos tuercas M2x10 y roscas metálicas en dos de sus extremos.

En la figura siguiente se muestra el interior de la caja, así como los componentes utilizados en la sujeción de las placas.



(A)



(B)



(C)

Figura 68-Fijación de las placas a la TX-Box. (A) Vista desde la caja en 3D. (B) Conector SMA para fijar la PCB RF. (C) Rosca y tuerca para sujetar la placa DC

En el Anexo 6 de este documento, se muestra el plano del MiniSAT con las clavijas añadidas y el plano de la tapa.

4.1.2. PCB de radiofrecuencia

La PCB de radiofrecuencia es la que se encarga de recibir la señal de entrada a una potencia y frecuencia variable, dentro de un rango, y enviarla a la frecuencia fija de 17.8 GHz y con una ganancia de 28.8 dB. En la sección anterior se ha explicado las condiciones y requerimientos de dicha señal.

Esta placa tiene dimensiones 5x5cm, dos conectores SMA (entrada y salida), y está formada por componentes MMIC sobre una placa de sustrato Rogers RO4003C. Debajo de éste, se encuentra una placa metálica que hace de tierra, de forma que las salidas de los componentes que van a tierra acceden a ésta mediante agujeros sobre la placa. En la figura siguiente, se muestra un esquemático de dicha placa.

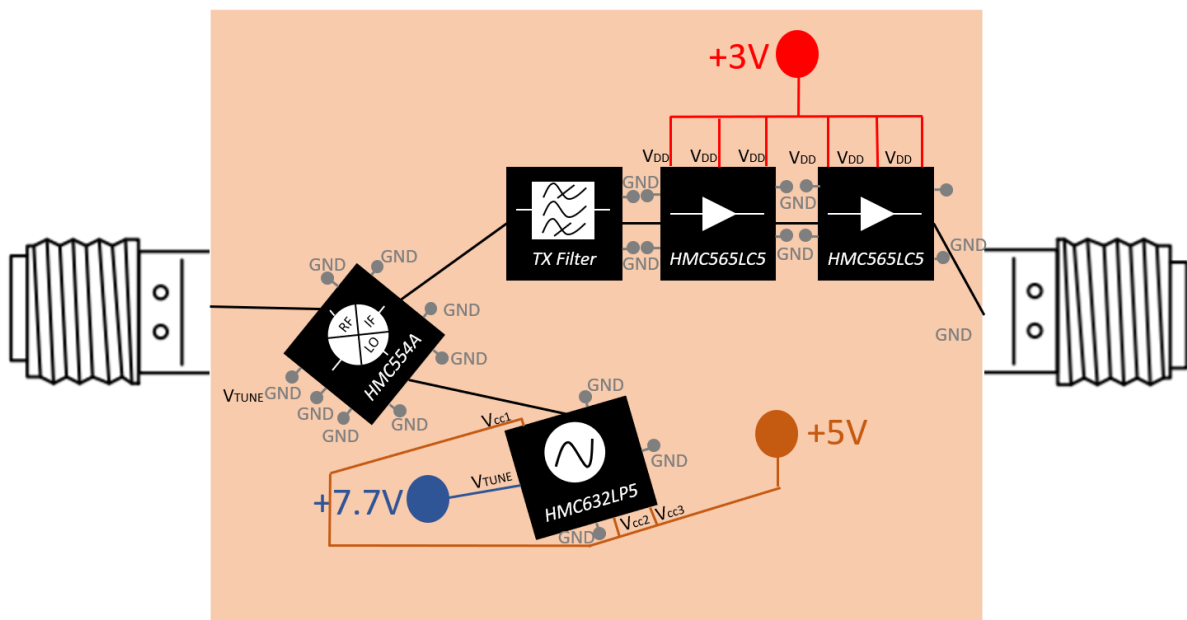


Figura 69-Diagrama de bloques orientativo de los componentes de la PCB de RF.

Cabe destacar que el esquemático que se muestra no representa ni en dimensiones ni en colocación de los bloques la PCB real, sino que es un diagrama de bloques que sirve únicamente de forma orientativa.

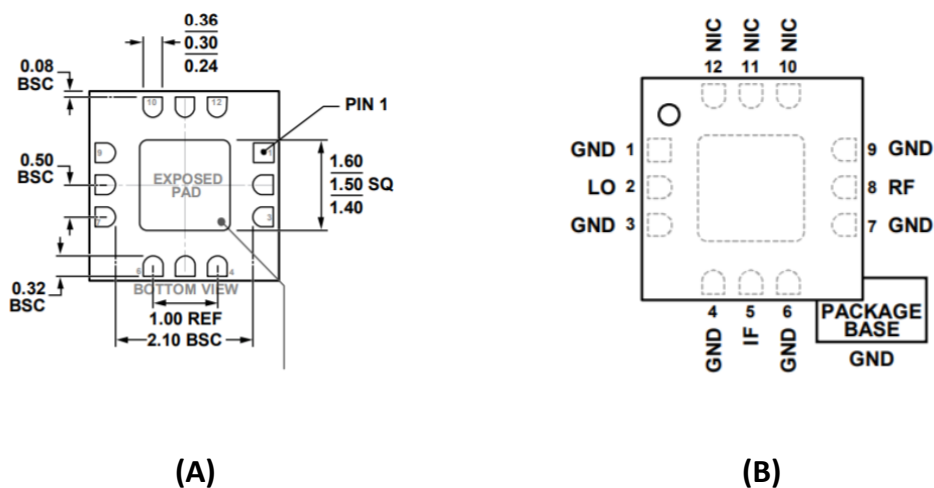
Así todo, se han evaluado las dimensiones de los componentes reales para comprobar que entran dentro de una placa de dimensiones 5x4cm.

Cada uno de los bloques en los que aparece representado cada componente abarca, no solo el componente en sí, sino el conjunto de elementos (condensadores, resistencias, bobinas, etc...) que son necesarios en cada uno.

- **Bloque HMC554A**

Es el bloque que corresponde con el mezclador HMC554A de Analog Devices. En esta PCB, se encuentra en modo upconverter de forma que mezcla la señal de entrada (IF) más la señal del oscilador (LO) para dar la señal (RF) que será la que terminará transmitiendo la TX-Box una vez pase por otra cadena de componentes.

En la figura siguiente se muestra tanto sus dimensiones como el diagrama de funcionamiento del mezclador, obtenidas del datasheet del componente [5].

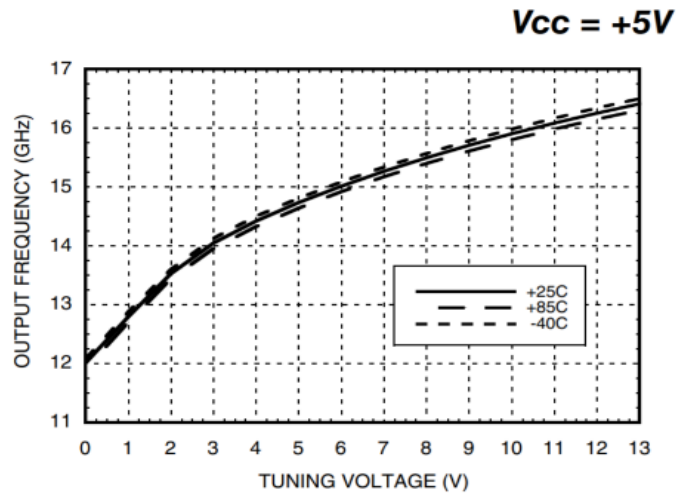


FUENTE: Datasheet del componente HMC554A de Analog Devices [5]

Figura 70-Mezclador HMC554A de Analog Devices. (A) Dimensiones en mm. (B) Diagrama de funcionamiento.

- **Bloque HMC632LP5**

Es el bloque que corresponde con el VCO HMC632LP5 de Analog. Este oscilador necesita una alimentación de 5V por 3 entradas, así como una señal VTUNE que, en función de su valor de tensión, varía la frecuencia de la señal emitida por el oscilador. En la figura siguiente se muestra una gráfica de la variación de esta frecuencia en función de dicha tensión, obtenida del datasheet del componente [8].

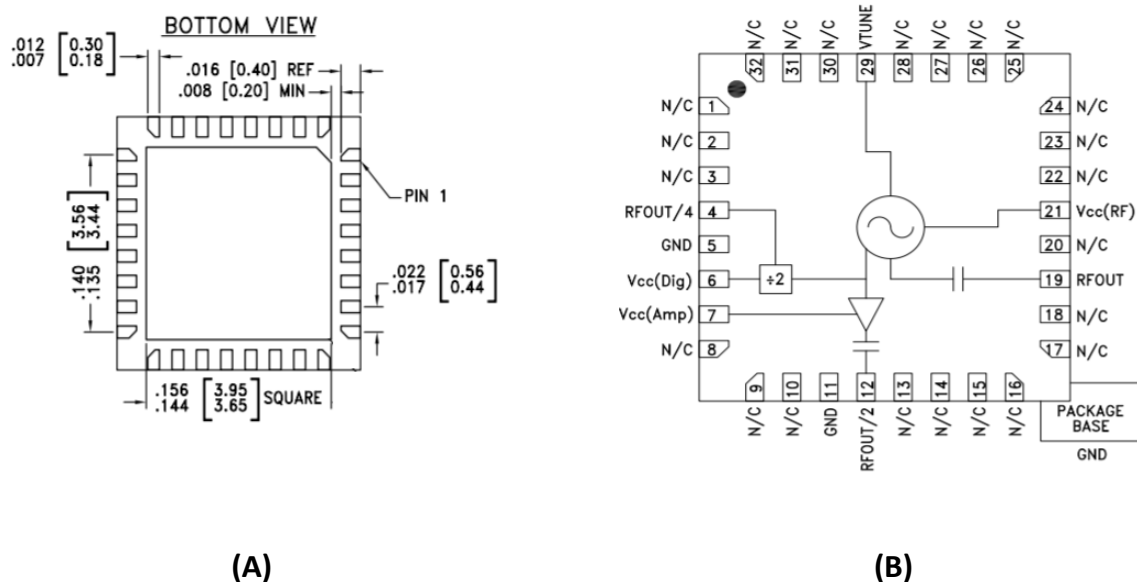


Fuente: Datasheet del componente HMC632LP5 de Analog [8]

Figura 71-Tuning Voltage VS Output frequency del VCO HMC632LP5 de Analog

Como este mezclador transforma $IF+OL = RF$, un aumento de la tensión de VTUNE provoca un aumento de la frecuencia OL. Esto permite que, si la señal de entrada tiene una f_{IF} baja, se pueden obtener los 17.8 GHz necesarios a la salida únicamente aumentando dicha tensión.

En la figura siguiente se muestran las dimensiones de dicho componente, así como su diagrama de funcionamiento.

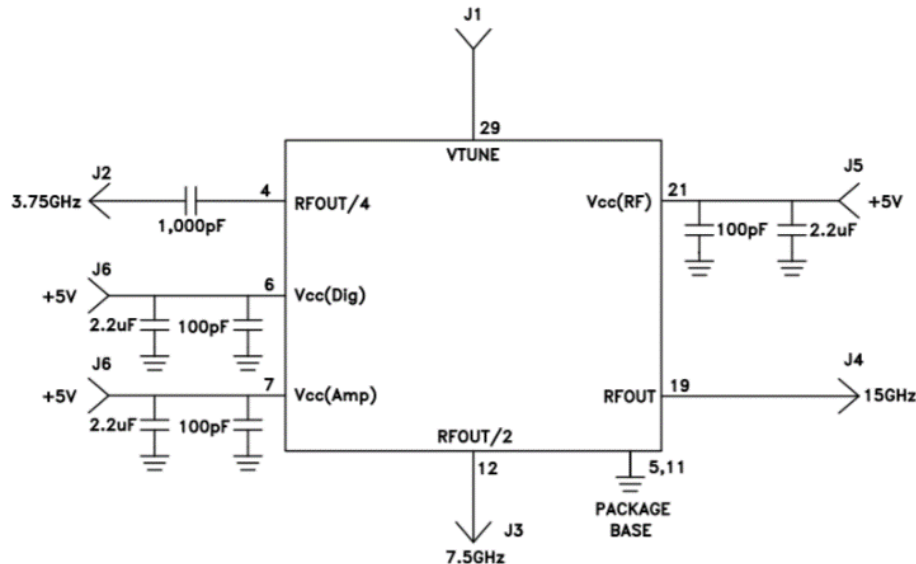


FUENTE: Datasheet del componente HMC632LP5 de Analog Devices [8]

Figura 72-Mezclador HMC632LP5 de Analog Devices. (A) Dimensiones en mm. (B) Diagrama de funcionamiento.

Cabe destacar que, en esta PCB, no se conectan las salidas RFOUT/2 y RFOUT/4, ya que carecen de utilidad en este diseño.

Para conectar el componente, es necesario añadir una serie de condensadores a algunos de sus pines, según especifica el fabricante, como se muestra en la figura siguiente, obtenida del datasheet [8].



FUENTE: Datasheet del componente HMC632LP5 de Analog Devices [8]

Figura 73-Diagrama del mezclador HMC632LP5 con detalles de los elementos a conectar.

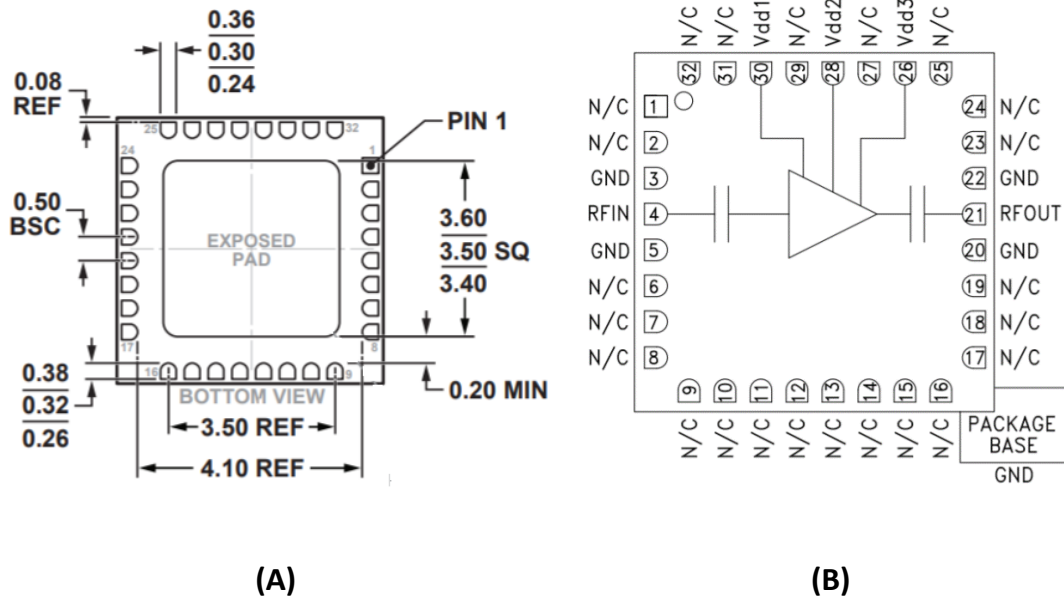
- **Bloque TX Filter**

Es el bloque que corresponde con el filtro paso banda diseñado mediante el programa ADS en este proyecto. Se trata de un filtro hecho de líneas acopladas que tiene una $f_c=17.8$ GHz y un gran ancho de banda para permitir en un futuro, si hiciese falta, modificar moderadamente la frecuencia de salida de la TX-Box.

Este filtro será fue explicado en el capítulo anterior de simulaciones.

- **Bloques HMC565LC5**

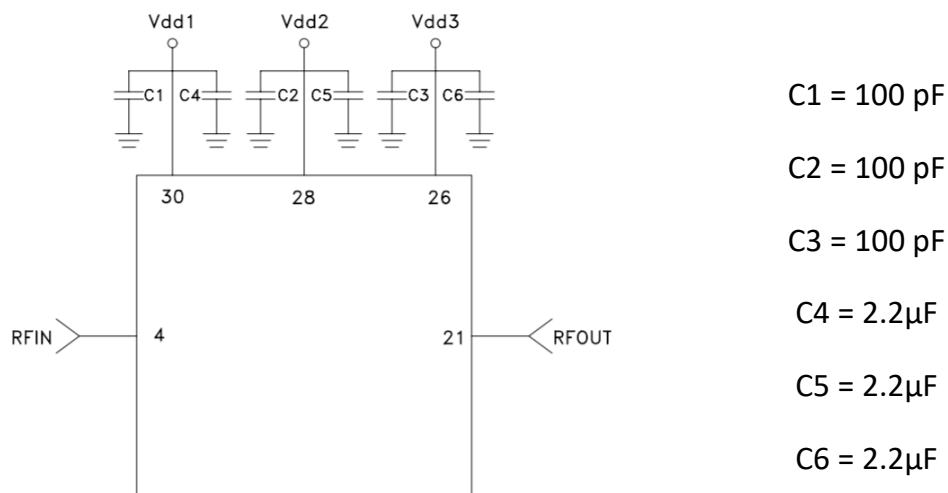
Son los bloques que corresponden con el modelo de amplificador HMC565LC5 de Analog Devices. Éste se alimenta a 3V y tiene las dimensiones y el diagrama de funcionamiento que se observa en la figura siguiente.



FUENTE: Datasheet del componente HMC565LC5 de Analog Devices [6]

Figura 74-Amplificador HMC565LC5. (A)Dimensiones en mm. (B) Diagrama de funcionamiento.

Para conectar el componente, es necesario añadir una serie de condensadores a algunos de sus pines, según especifica el fabricante, como se muestra en la figura siguiente, obtenida del datasheet [6].



FUENTE: Datasheet del componente HMC632LP5 de Analog Devices [6]

Figura 75-Diagrama del amplificador HMC565LC5 de Analog Dices con detalles de los elementos necesarios para su correcto funcionamiento.

4.1.3. Placa de alimentación TX-Box

La placa de alimentación de la TX-Box tiene como objeto suministrar y regular la tensión que alimenta a la PCB de radiofrecuencia y el ventilador. Para ello, de forma externa, se le introduce una tensión de entre 7.2 y 13V por dos cables conectados en los otros extremos a las clavijas de alimentación de la TX-Box. Este rango de tensión, como se ha explicado anteriormente, está relacionado con la frecuencia de la señal de entrada en la TX-Box.

Esta placa tiene las mismas dimensiones que la PCB de radiofrecuencia (5x5 cm) y, como se ha explicado anteriormente, queda fijada a la TX-Box mediante dos roscas y tuercas en dos de los extremos de la placa. En la siguiente figura, se muestra tanto el layout de la placa como el esquemático del circuito para la tensión de alimentación recomendada.

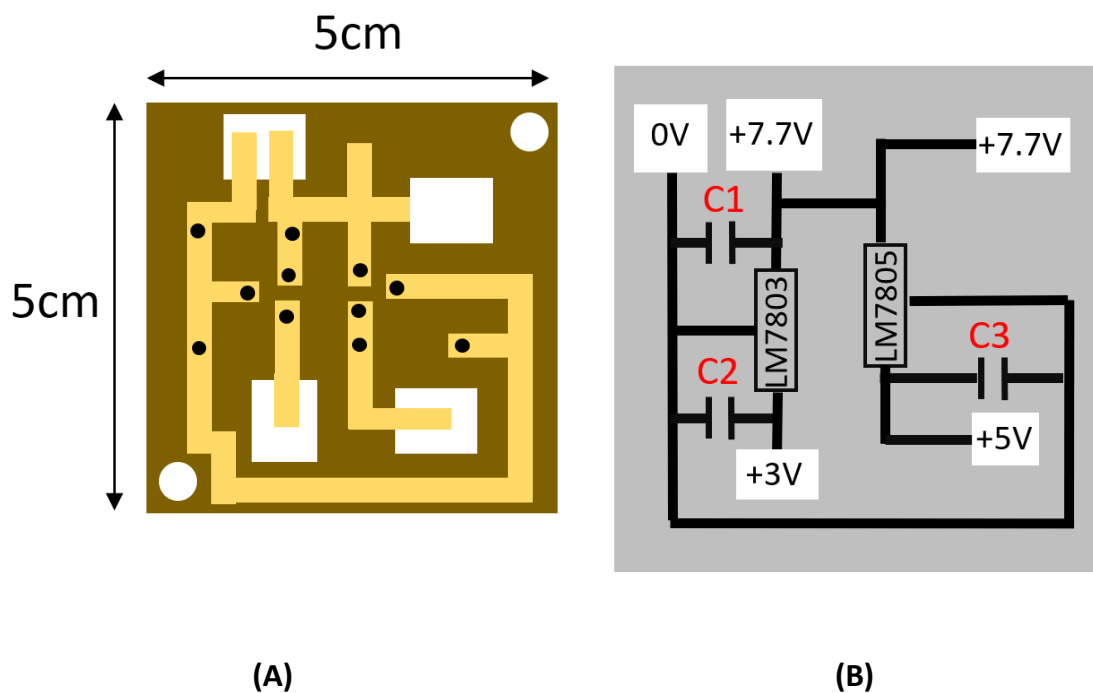


Figura 76-Placa de alimentación de la TX-Box. (A) Layout. (B) Esquemático.

Para la configuración recomendada, la tensión de entrada en la placa DC es de 7.7V, pues, como se ha explicado anteriormente, es aquella que permite obtener a la salida de la TX-Box una frecuencia de 17.8 GHz a partir de una entrada a 2.4 GHz.

Por un lado, esta tensión de 7.7V sale directamente de la placa para controlar la señal VTUNE del oscilador de la PCB de RF.

Por otra parte, con el fin de obtener los 3 y 5V necesarios para alimentar la PCB de RF y el ventilador, se usan reguladores **LM78XX en encapsulado TO-220** de STMicroelectronics.

El primer regulador (**LM7803**) permite obtener en su salida una señal estable de 3V independientemente de la señal de entrada DC que se aplique siempre que sea, al menos, 1.75V superior y hasta un máximo de 35V, como indica el datasheet del fabricante [9]. El segundo regulador (**LM7805**) funciona de forma similar. Permite obtener una señal de 5V estable siempre que sea, al menos, 2.2V superior a la tensión de entrada y hasta un máximo de 35V, como indica el datasheet del fabricante [10].

La PCB de RF consume 350 mA de la salida de 5V de la placa de alimentación, y 106 mA de la salida de 3V de dicha placa. Además, el ventilador consume 120mA. Por lo tanto, ambos reguladores son capaces de abarcar este consumo puesto que los datasheet de los fabricantes especifican que el valor de corriente máxima que soportan los reguladores es de 1.5A y 1A en el LM7803 y LM7805, respectivamente. [9,10].

C1, C2 y C3 son condensadores cerámicos de forma que **C1=0.33μF** y **C2=C3=0.1μF**. Estos condensadores son recomendados colocar en el circuito según el fabricante, con el fin de estabilizar la señal.

4.2. Sistema SAT

El sistema SAT comprende el conjunto de componentes encargados de recibir una señal externa a 17.8 GHz con una potencia variable, y obtener a la salida una frecuencia de 15.7 GHz y ganancia de 69.7 dB. Este sistema se compone de una caja “Minisat” que alberga tanto la PCB de radiofrecuencia como la placa DC que alimenta dicha PCB.

La potencia de entrada mínima y máxima en el MiniSAT será de -87 y -40 dBm. La potencia máxima viene limitada por el P1dB del último amplificador de la cadena mientras que la potencia mínima está condicionada por la potencia mínima que transmite el TX-Box y la distancia máxima a la que se pueden encontrar ambos equipos.

Este sistema, a diferencia de la TX-Box y RX-Box se autoalimenta mediante una batería interna. Ésta, a su vez, puede ser alimentada conectándola a un enchufe común de corriente alterna de 220V, o bien mediante 8 paneles solares que se encuentran en la parte superior de la caja.

Otra característica de este sistema es que, gracias a su sistema de autoalimentación, puede colocarse en un lugar apartado, o incluso en el exterior, siempre que se cumpla el requisito de una distancia máxima de 20 metros del TX-Box y del RX-Box.

Sin embargo, como se detallará más adelante, el Minisat no puede dejarse en el exterior en condiciones de lluvia, nieve o granizo, puesto que no se garantiza la impermeabilidad total de la caja.

En las secciones siguientes de este documento se detallará la caja del sistema SAT, así como todo el sistema de autoalimentación y la PCB de radiofrecuencia.

4.2.1. Caja MiniSAT

MiniSAT es el nombre que recibe la caja en la que encuentran los componentes asociados a la simulación del satélite. Se puede ver como una caja “negra” con dos conectores SMA. Uno por el que entra una señal a 17.8 GHz y otro por el que sale a 15.7 GHz con una ganancia de 69.7 dB, sin necesidad de ser alimentada en funcionamiento. En la figura siguiente se observa dicha caja.

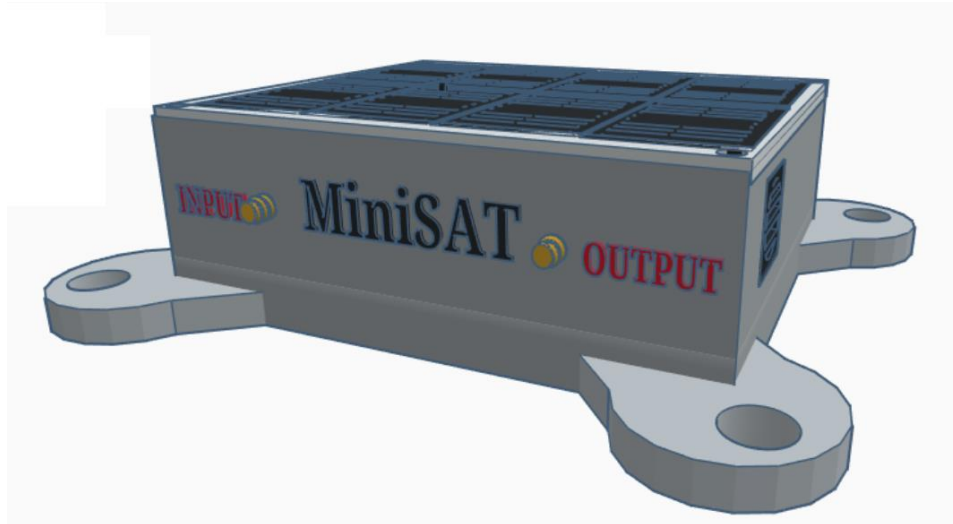


Figura 77-Dibujo en 3D del MiniSAT visto desde fuera

En la figura anterior se aprecian las dos entradas RF (INPUT y OUTPUT), así como cuatro “patas” en cada extremo con el fin de facilitar el amarre de la caja a la superficie.

La caja posee una tapa superior, para facilitar el montaje, que se encaja en el MiniSAT mediante tornillos avellanados M3x10. En la figura siguiente se muestran las dos partes que han de unirse.

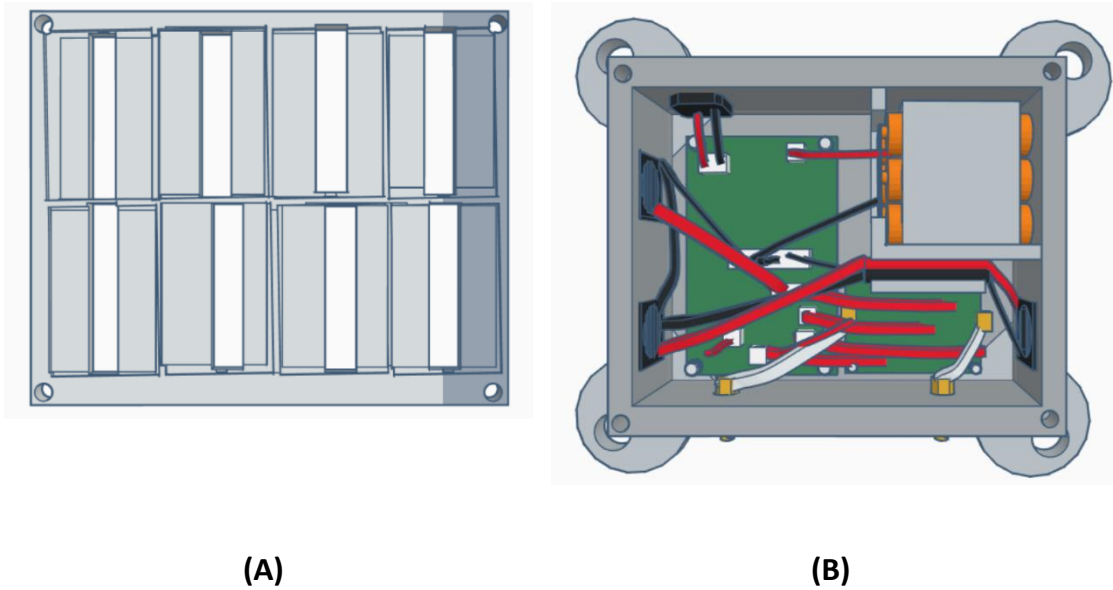


Figura 78-(A) Tapa del MiniSAT sin paneles solares. (B) Caja MiniSAT vista desde arriba.

En la figura anterior, se muestra la tapa sin paneles solares, los cuales se pegan encima. El material del que se compone tanto la estructura de la caja como la tapa es acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), al igual que en la TX-Box. Este material, además, resiste bien al agua u a otras adversidades meteorológicas.

En los laterales, el Minisat, posee tres ventiladores. El mismo modelo usado en la TX-Box de Cablematic de 5V y 0.12A. Se encuentra anclado al MiniSAT por tornillos. En la figura siguiente se muestra la posición de cada uno en la caja.

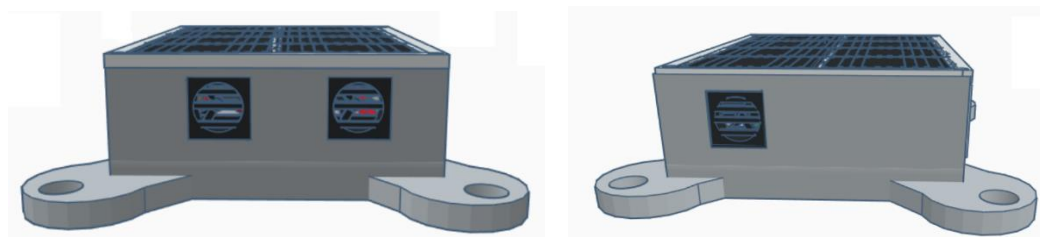
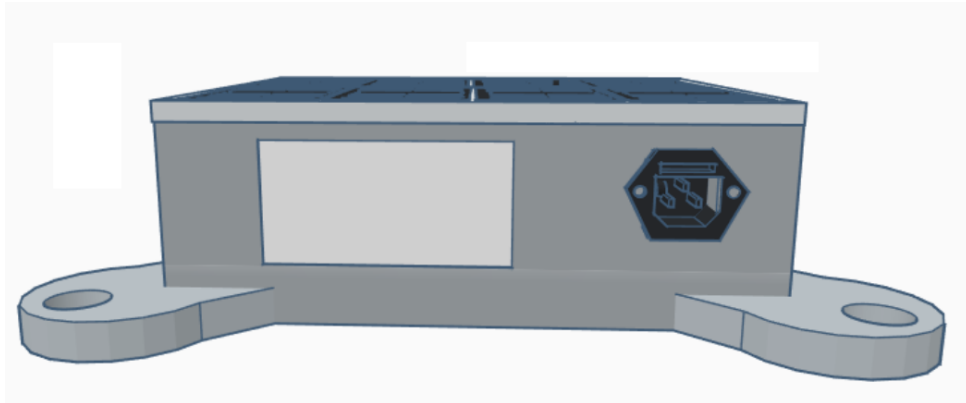


Figura 79-Posición de los ventiladores en los laterales del MiniSAT

En otro de los laterales, posee una pegatina 8x4 cm en la que se muestra información de la caja, así como un conector de alimentación IEC C14 de C.A., como se observa en la figura siguiente. Este conector posee un fusible para proteger la placa de alimentación de posibles picos de corriente.



(A)



(B)

MiniSAT *Proyecto fin máster José Bengoechea Cuadrado*

INPUT	Freq (GHz)	17.8
	Pot. (dBm)	< -60
OUTPUT	Freq (GHz)	15.7
	GANANCIA (dB)	46.5
BATERIA		7.4V / 6.6

(C)

Figura 80-Lateral del MiniSAT. (A) Visto desde el dibujo 3D. (B) Conector IEC C14 utilizado. (C) Detalle de la pegatina del lateral

Por último, dentro del MiniSAT se encuentran la PCB de RF, la placa de alimentación y la batería. La PCB RF tiene medidas 6x6.8 cm, mientras que la placa de alimentación mide 12x8.5 cm. Ambas placas van fijadas en sus extremos a la caja mediante tornillos avellanados M2x4 y M1.6x4, respectivamente.

En la figura siguiente se puede apreciar más detalle la distribución de los componentes dentro de la caja. La batería, los paneles solares y las placas se explicarán con más detalle en las secciones 3.2.2. y 3.2.3. de este documento.

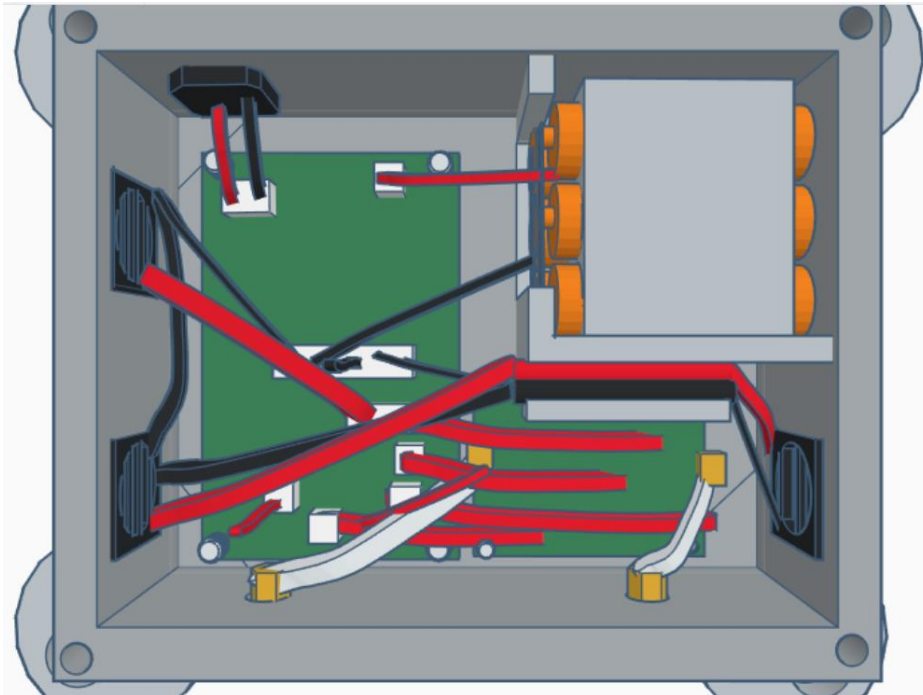


Figura 81-Dibujo en 3D del interior de la caja MiniSAT con detalles de los componentes y conexiones

La PCB de RF tiene tanto a la entrada como a la salida conectores SMA. Éstos se conectan a la salida del MiniSAT mediante un cable coaxial semirrígido. En la figura siguiente, se muestra el tipo de cable usado, así como el conector SMA externo de la caja. Por otra parte, de la placa de alimentación se distribuyen cables a la batería, paneles solares, ventiladores, conector IEC C14 y PCB de RF.



(A)



(B)

Figura 82-Cable coaxial semirrígido usado para conectar la salida externa con la PCB RF.

En el Anexo 7 de este documento, se muestra el plano del MiniSAT con las clavijas añadidas y el plano de la tapa

4.2.2. Alimentación del MiniSAT

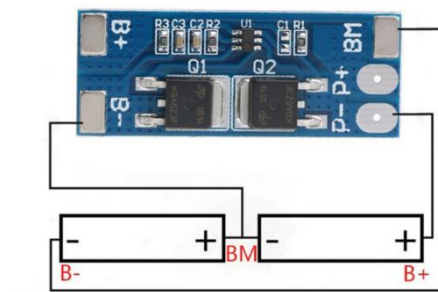
- **Batería**

El MiniSAT se alimenta mediante una batería interna de 7.4V y 6600mAh. Esta batería está compuesta por 2 celdas de 3 pilas cada una, modelo 18650. Cuenta con un circuito BMS (*Battery Management System*), encargado de controlar el nivel de descarga de cada celda y proteger la batería frente a cortocircuitos y/o picos.

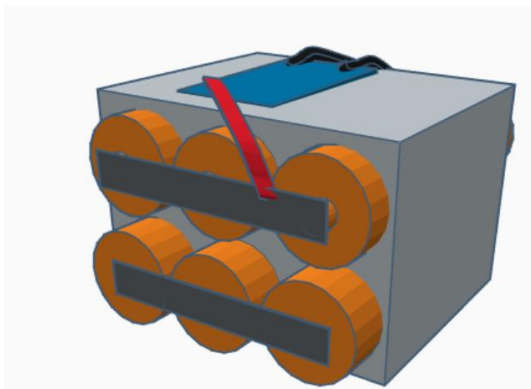
En la figura siguiente se muestra el modelo de pila 18650, el circuito BMS, y un dibujo en 3D de la batería en su conjunto.



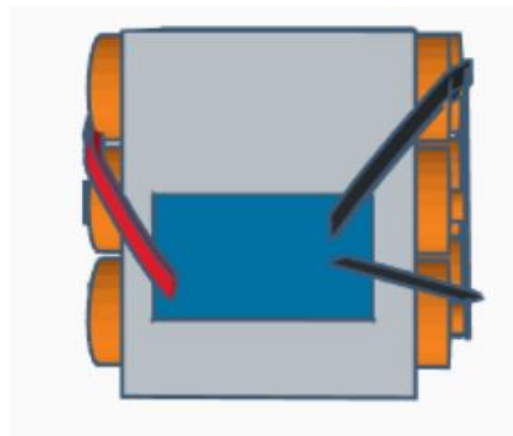
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 83-Componentes de la batería de ion de litio usada en el MiniSAT. (A) Pilas modelo 18650. (B) Circuito BMS. (C) Dibujo en 3D con todos los componentes integrados. (D) Dibujo en 3D con detalles de conexiones en el BMS.

El modelo de pila 18650 tiene un voltaje de 3.7V, así como un voltaje máximo de 4.2V (100% de carga) y uno mínimo de 3.2V (0% de carga). Por esta razón, como la batería del MiniSAT utiliza 2 celdas en serie, el voltaje necesario para cargar la batería en sus extremos es de 8.4V. Para este proyecto, se usan pilas con capacidad de 3300mAh. Este tipo de pilas tiene una eficiencia de carga/descarga de entre un 80-90%.

Teniendo en cuenta el consumo de la PCB de RF, la placa de alimentación y los ventiladores (en torno a 800-850mAh), el MiniSAT tiene una autonomía de 6,21 horas en el peor de los casos (para el consumo más alto y eficiencia más baja).

Para conectar las placas pilas en serie y/o paralelo, se utilizan tiras de níquel soldadas en las pilas mediante una soldadora de punto para evitar que las pilas se calienten. Por otra parte, para conectar las pilas con el BMS, se utilizan cables finos.

- **Paneles solares**

El MiniSAT dispone de 8 paneles solares fijados a la tapa. Se trata de placas solares de 2V y 200mA, y de dimensiones 70x44x2.2cm. Estas placas se encuentran conectadas en serie de forma que se produce una tensión de C.C. de 16V entre el extremo positivo y el negativo de la unión cuando la radiación solar es más intensa.

En la figura siguiente se muestra la placa solar utilizada en este proyecto del fabricante Cetronic.

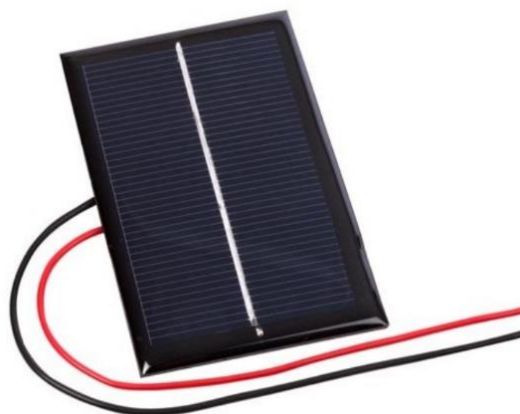


Figura 84-Placa solar de Cetronic utilizada en este proyecto

Los dos extremos (positivo y negativo) de la unión de paneles solares se conectan mediante cables a la placa de alimentación del MiniSAT. Esta placa posee un circuito encargado de transformar la señal que llega procedente de los paneles en C.C. de 8.4V, necesarios para cargar la batería.

Más adelante, en esta misma sección del documento, se explicará detalladamente el funcionamiento de dicho circuito en la placa de alimentación.

- **Placa de alimentación**

El objetivo de la placa de alimentación es suministrar la energía necesaria a los componentes que la necesitan. Esto lo hace a partir de sus salidas a 5V, 3.3V, 3V, y una salida con tensión variable (entre 8.4 y 0V) dependiendo la frecuencia a la que desea que transmita el oscilador local de la PCB de RF. Esta tensión variable se modifica a través de un potenciómetro. Cabe destacar que para conseguir que el oscilador transmita una señal a la frecuencia de 2,4 GHz (frecuencia usada en las simulaciones de este proyecto), es necesario fijar esta tensión a 2.5V.

Además, el MiniSAT se autoalimenta a través de su batería interna, como se ha explicado anteriormente, y ésta puede ser cargada de dos formas diferente. Por esta razón, en la placa se distinguen 3 partes que se explicarán a continuación.

En la figura siguiente, se muestra tanto el layout como el esquemático de la placa de alimentación.

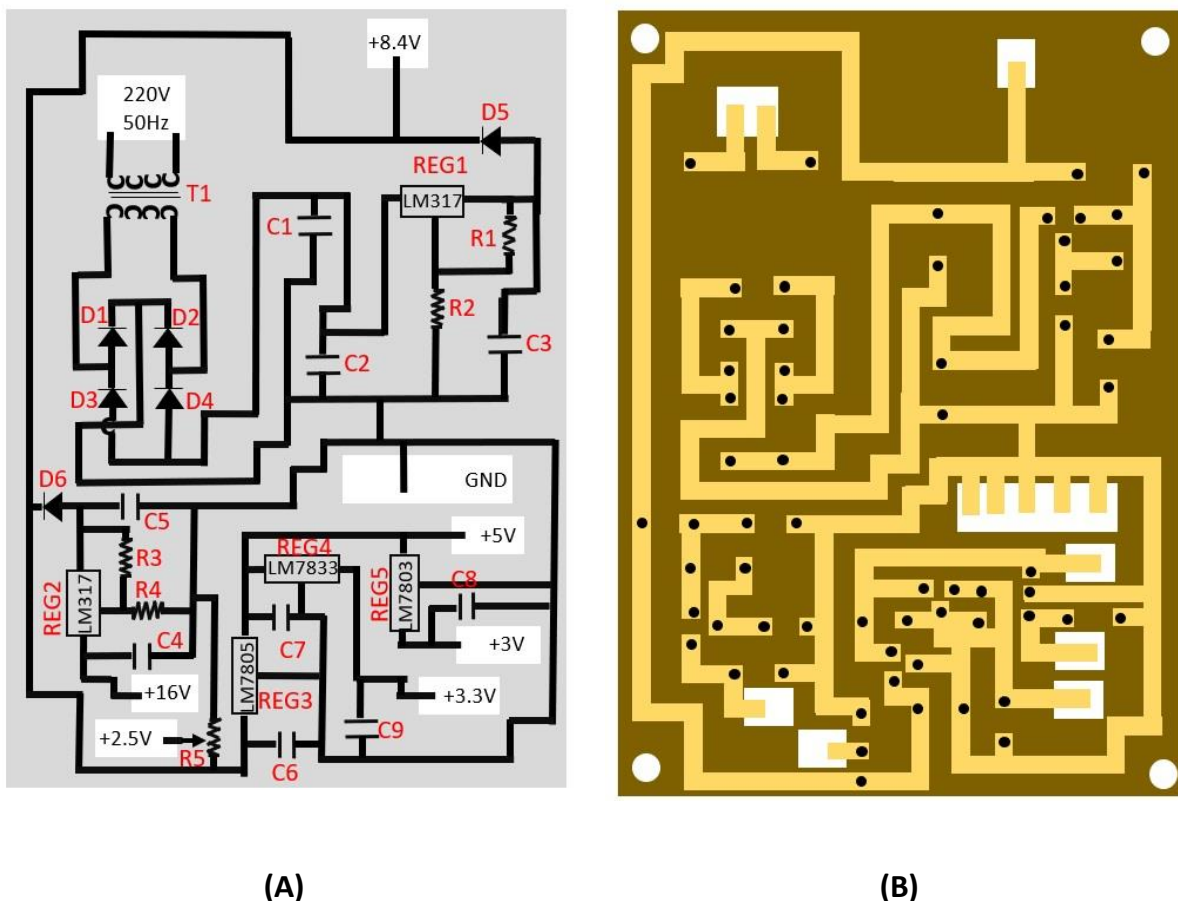


Figura 85--Placa de alimentación del MiniSAT. (A) Esquemático. (B) Layout.

○ **Circuito puente rectificador**

Una de las partes de la placa de alimentación es la que concierne al circuito puente rectificador, encargado de transformar la C.A. de 220V 50Hz en C.C. de 8.4V. Este voltaje permite, o bien cargar la batería, o bien “ayudarla” a suministrar la energía que demandan el resto de componentes del MiniSAT.

La C.A. de 220V 50 Hz llega a la placa de alimentación a través de un cable desde el conector IEC320 C14 de la caja, como se ha explicado anteriormente. Este conector posee un fusible para proteger la placa de alimentación de posibles picos de corriente. Por otro lado, el conector IEC320 C14 es alimentado por un cable que puede ser conectado a cualquier terminal común de 220V y 50Hz de cualquier edificio.

En la figura siguiente, se observa la parte de la placa de alimentación que corresponde con este circuito rectificador.

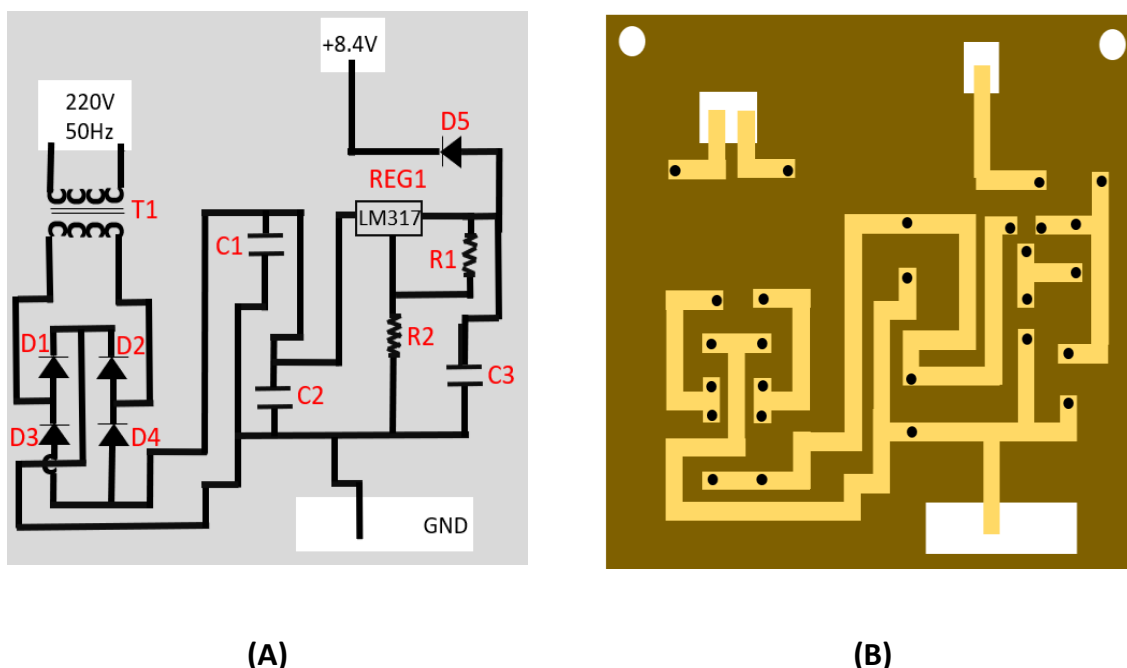


Figura 86-Parte de la placa DC que corresponde con el circuito puente rectificador. (A) Esquemático. (B) Layout.

La señal de 220V 50Hz entra al circuito proveniente del conector IEC312 C14. El transformador **T1** se encarga de transformar los **220V en 6V**. Se trata del modelo TE06932 de SABERSL. Este modelo permite que circule la corriente a 533mA a la salida de la parte secundaria.

D1,D2,D3 y **D4** son diodos de silicio 3A 600V del fabricante Diotronic. Este conjunto de diodos permite rectificar la señal transformándola en una señal de lóbulos o pulsos positivos, como se muestra en la figura siguiente.

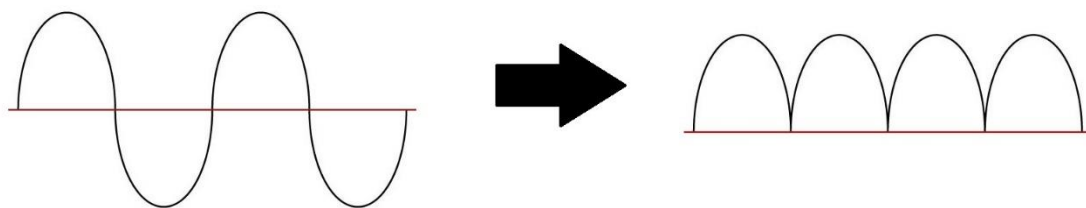


Figura 87-Transformación de la señal sinusoidal en pulsos positivos debido al puente de diodos.

El condensador **C1** tiene un valor de **2200 μ F**. A éste le llega la señal de pulsos mostrada en la figura anterior de forma que carga se carga y descarga parcialmente permitiendo la rectificación de la señal, como se muestra en la figura siguiente.

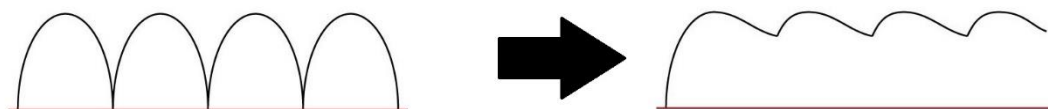


Figura 88-Rectificación de la señal al cargar y descargarse el condensador.

Por último, esta señal, que se puede considerar continua y de 6V, entra a **REG1**, el cual es un regulador de tensión **LM317** del fabricante ON Semiconductor. La tensión entre la patilla ajuste y salida de este regulador es siempre de 1,25 voltios (tensión establecida internamente por el regulador). Esto permite que, variando el valor de las resistencias **R1** y **R2** se pueda obtener el valor de tensión deseado. Como se desean obtener 8.4V, **R1** y **R2** han de valer **8k2** y **47k Ω** , respectivamente.

Los condensadores **C2** y **C3** tienen un valor de **0.1 μ F** y **1 μ F**, respectivamente. Son recomendados por el fabricante del regulador en su datasheet [11] con el objeto de mejorar el rechazo del rizado y la respuesta a transitorios, respectivamente.

El diodo **D5** es un diodo de silicio que evita que por el circuito rectificador circule corriente en sentido opuesto proveniente de la batería cuando el MiniSAT no está enchufado a la corriente alterna.

○ **Circuito regulador de tensión proveniente de las placas solares**

Este circuito se encarga de recibir la corriente proveniente de los paneles solares y transformarla a los 8.4V necesarios para cargar las baterías.

En la figura siguiente, se observa la parte de la placa de alimentación que corresponde con este circuito.

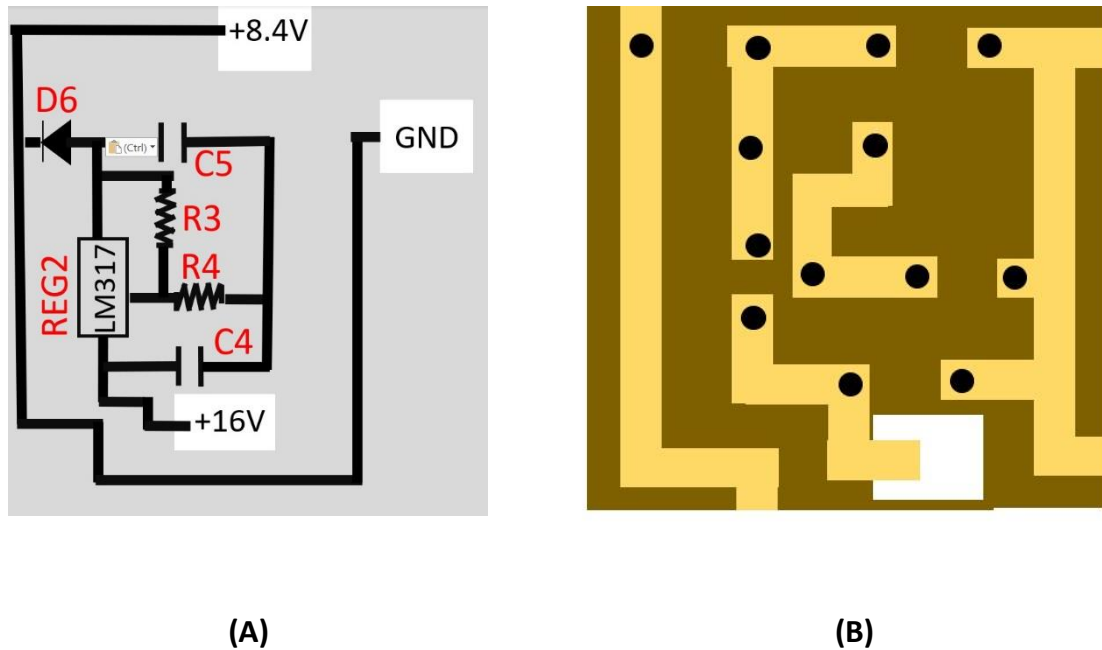


Figura 89-Parte de la placa DC que corresponde con el circuito regulador de tensión proveniente de las placas solares. (A) Esquemático. (B) Layout.

El mecanismo empleado para regular la tensión es similar al utilizado en el circuito rectificador. Se trata de un regulador de tensión (**REG2**) LM317 y un conjunto de resistencias y condensadores que tienen los mismos valores y actúan de la misma forma que en el circuito rectificador. Así pues, **$R1=R3$, $R2=R4$, $C4=C2$ y $C5=C3$** .

Como el voltaje de entrada proveniente de las placas solares varía en función de la radiación solar que incida sobre ellas, en algunos casos no circula corriente por este circuito. Para que circule, debe de haber una tensión de entrada mínima de 4.25V (tensión de entrada mínima mediante la cual trabaja el regulador LM317). Esta tensión supone un promedio de 0.53V en cada placa solar.

Por último, el diodo **D6** es un diodo de silicio que evita que circule corriente en sentido opuesto proveniente de la batería cuando no se alcanza la tensión de 4.25V anteriormente descrita.

○ **Circuito suministrador de corriente**

Por último, se encuentra el circuito que suministra la corriente necesaria para alimentar el MiniSAT. Como se ha explicado anteriormente, el MiniSAT requiere autoalimentarse con voltajes de 5V, 3.3V, 3V, y un voltaje variable entre 0 y 8.4V. En la figura siguiente se muestra dicho circuito.

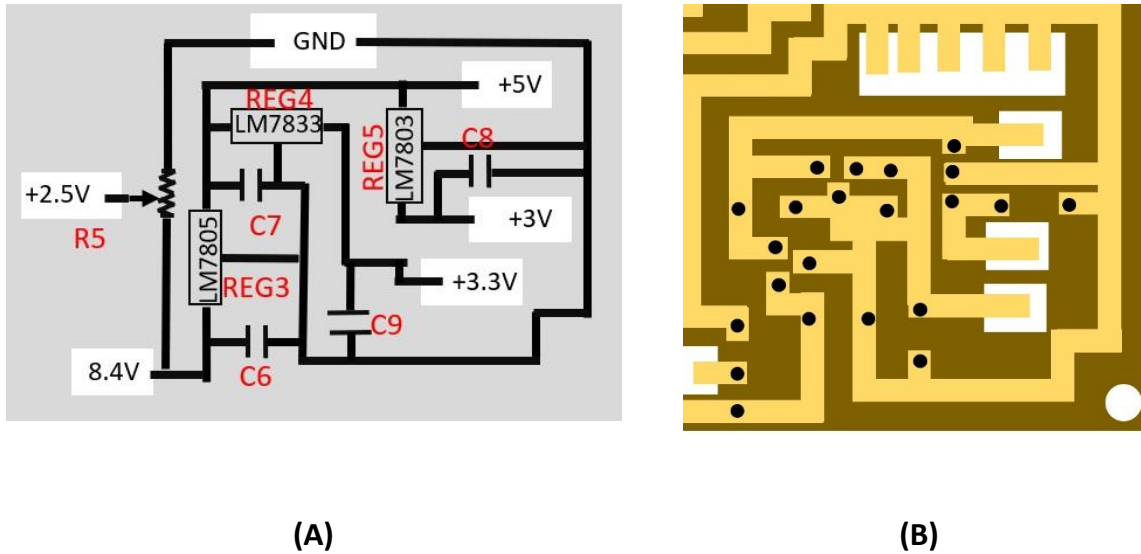


Figura 90-Parte de la placa DC que corresponde con el circuito suministrador de corriente.
(A) Esquemático. (B) Layout.

Para obtener el voltaje deseado, se utilizan los reguladores **REG3**, **REG4** y **REG5**, que corresponden con los componentes LM7805, LM7833 y LM7803, respectivamente. Estos reguladores permiten obtener a la salida 5V, 3.3V y 3V.

Al igual que con los reguladores LM317, el datasheet de sus fabricantes [9,10] recomiendan poner condensadores en la entrada y salida de cada regulador. En este caso, **C6**, **C7**, **C8** y **C9** son condensadores de cerámica de **10 μ F**.

Por otra parte, para obtener en la otra salida una tensión variable se utiliza el potenciómetro **R5**. Sin embargo, se recomienda configurarlo permanentemente de forma que se obtengan 2.5V a la salida, ya que este valor permite que el oscilador del MiniSAT transmita a una frecuencia de 2.1 GHz (utilizada en las simulaciones de este proyecto).

4.2.3. PCB de radiofrecuencia del MiniSAT

La PCB de radiofrecuencia del MiniSAT es la que se encarga de recibir una señal de entrada de potencia variable (configurada en la TX-Box) y frecuencia 17.8 GHz, y obtener a la salida una frecuencia a 15.7 GHz y una ganancia de 69.7 dB.

Esta placa tiene dimensiones 6x6.8cm, dos conectores SMA (entrada y salida), y está formada por componentes MMIC sobre una placa de sustrato Rogers RO4003C. Debajo de éste, se encuentra una placa metálica que hace de tierra, de forma que las salidas de los componentes que van a tierra acceden a ésta mediante agujeros sobre la placa. En la figura siguiente, se muestra un esquemático de dicha placa.

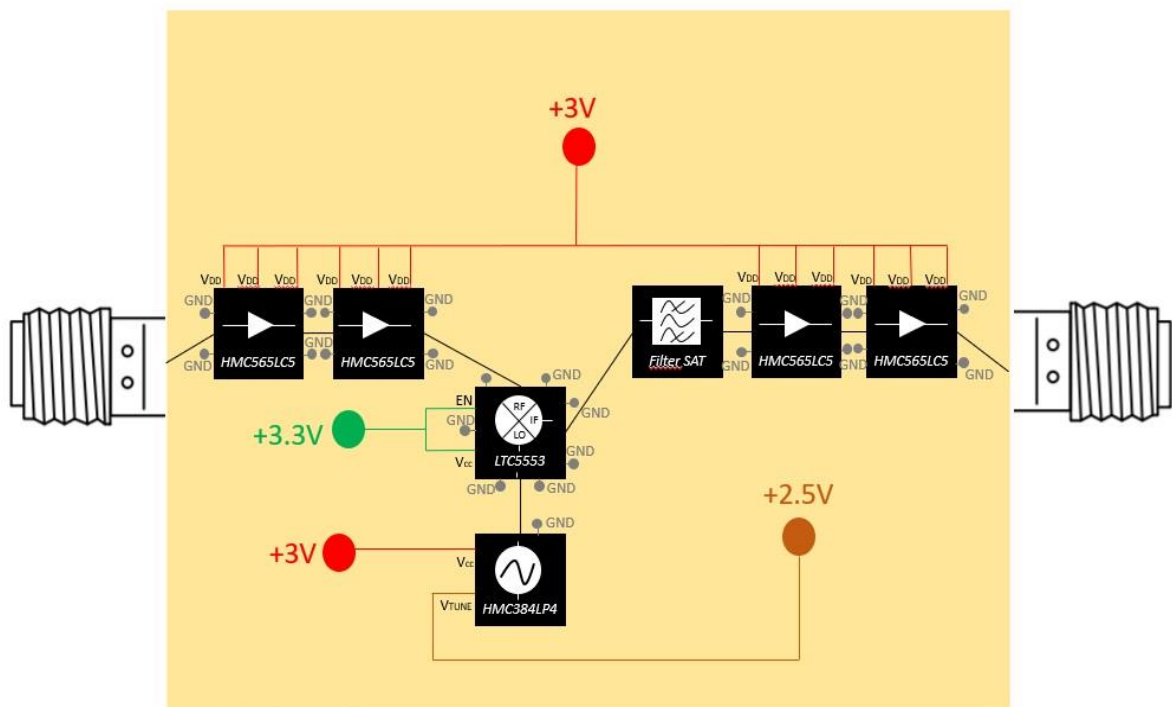


Figura 91- Diagrama de bloques orientativo de los componentes de la PCB de RF.

Cabe destacar que el esquemático que se muestra no representa ni en dimensiones ni en colocación de los bloques la PCB real, sino que es un diagrama de bloques que sirve únicamente de forma orientativa.

Así todo, se han evaluado las dimensiones de los componentes reales para comprobar que entran dentro de una placa de dimensiones 5x4cm.

Al igual que la PCB RF de la TX-Box, cada uno de los bloques en los que aparece representado cada componente abarca, no solo el componente en sí, sino el conjunto de elementos (condensadores, resistencias, bobinas, etc...) que son necesarios en cada uno.

- **Bloque HMC565LC5**

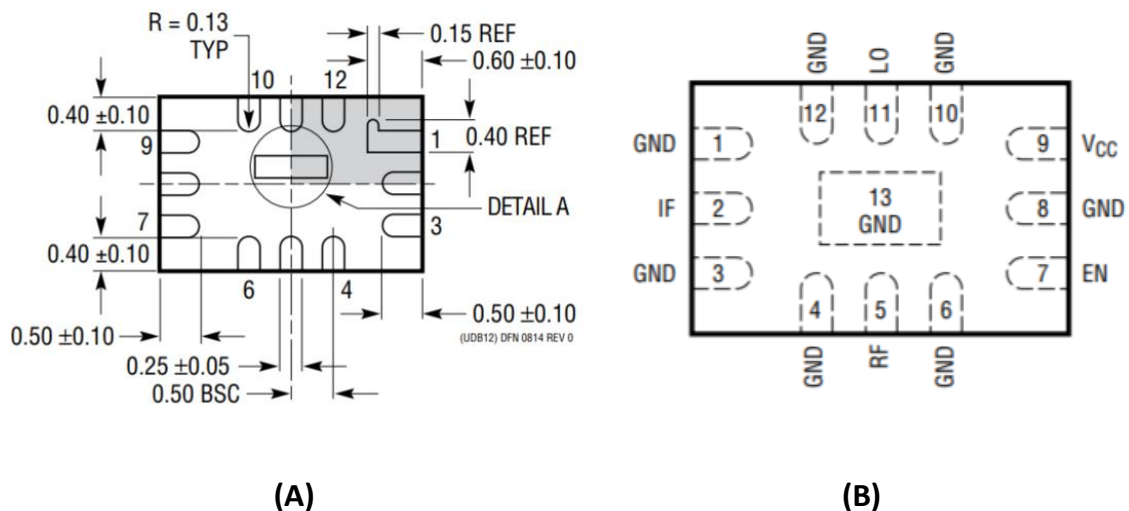
Son los bloques que corresponden con el modelo de amplificador HMC565LC5 de Analog Devices. Como se trata del mismo amplificador que se usa en la TX-Box, en la sección 4.1.2. fue detallado todo lo correspondiente a su funcionamiento, dimensiones, diagramas, etc.

- **Bloque LTC5553**

Es el bloque que corresponde con el mezclador LTC5553 de Analog Devices. En esta PCB, se encuentra en modo downconverter de forma que mezcla la señal de entrada (RF) menos la señal del oscilador (LO) para dar la señal (RF) que será la que se obtendrá a la salida del MiniSAT.

Este mezclador se alimenta a 3.3V, y tiene una señal ENABLE que permite activar su funcionamiento siempre que su valor se encuentre entre 1.2V y $V_{cc}+0.3V$ (3.6V).

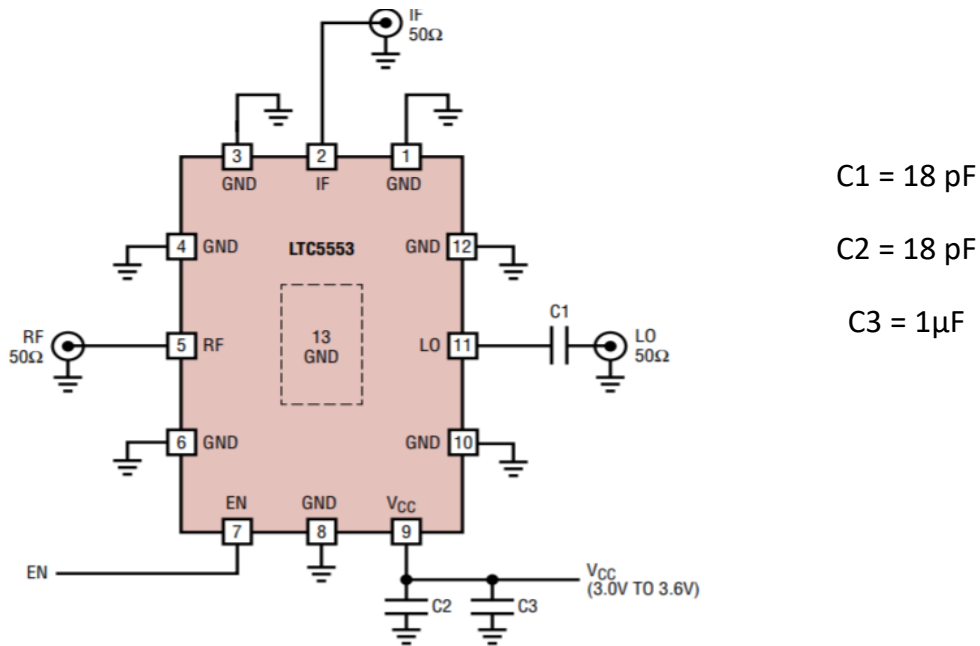
En la figura siguiente se muestra tanto sus dimensiones como el diagrama de funcionamiento del mezclador, obtenidas del datasheet de su fabricante [7].



FUENTE: Datasheet del componente LTC5553 de Analog Devices [7]

Figura 92-Mezclador LTC5553 de Analog Devices. (A) Dimensiones en mm. (B) Diagrama de funcionamiento.

Para conectar el componente, es necesario añadir una serie de condensadores a algunos de sus pines, según especifica el fabricante, como se muestra en la figura siguiente, obtenida del datasheet [8].



FUENTE: Datasheet del componente HMC632LP5 de Analog Devices [8]

Figura 93-Diagrama del amplificador LTC5553 de Analog Dices con detalles de los elementos necesarios para su correcto funcionamiento.

- **Bloque Filter SAT**

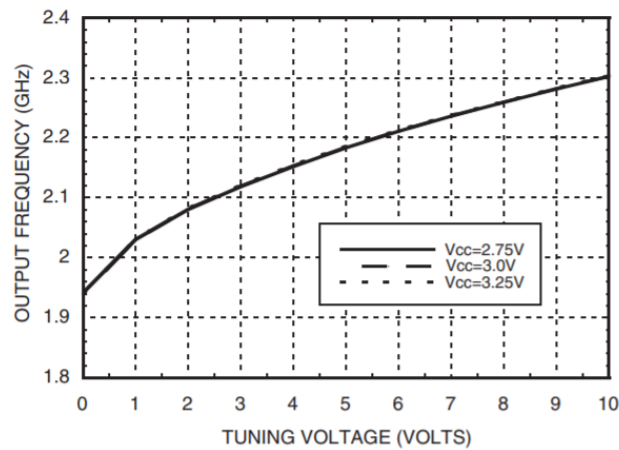
Es el bloque que corresponde con el filtro paso banda del MiniSAT diseñado mediante el programa ADS en este proyecto. Se trata de un filtro hecho de líneas acopladas que tiene una $f_c=15.7$ GHz y un gran ancho de banda para permitir en un futuro, si hiciese falta, modificar moderadamente la frecuencia del oscilador local.

Este filtro fue explicado en las simulaciones del capítulo anterior.

- **Bloque HMC384LP4**

Es el bloque que corresponde con el VCO HMC384LP4 de Analog. Este oscilador tiene una señal de entrada VTUNE que, en función de su valor de tensión, varía la frecuencia de la señal emitida por el oscilador. En la figura siguiente se muestra una gráfica de la variación de esta frecuencia en función de dicha tensión, obtenida del datasheet del componente [12] .

Frequency vs. Tuning Voltage, $T = 25^{\circ}\text{C}$

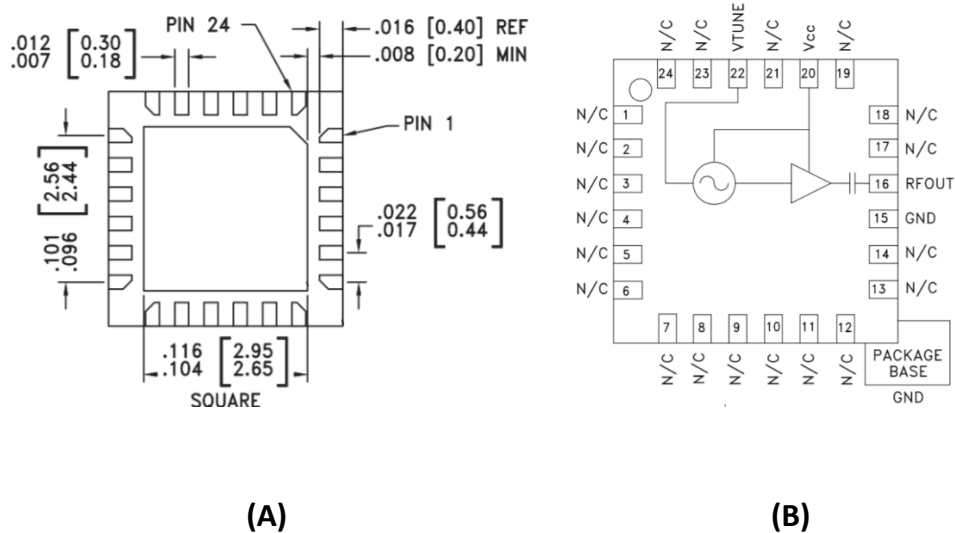


Fuente: Datasheet del componente HMC384LP4 de Analog [12]

Figura 94-Tuning Voltage VS Output frequency del VCO HMC384LP4 de Analog

Como este mezclador transforma $\text{RF} - \text{OL} = \text{IF}$, un aumento de la tensión de VTUNE provoca un aumento de la frecuencia OL. Esto permite que, en el futuro, se pudiera modificar la frecuencia del OL si fuera necesario.

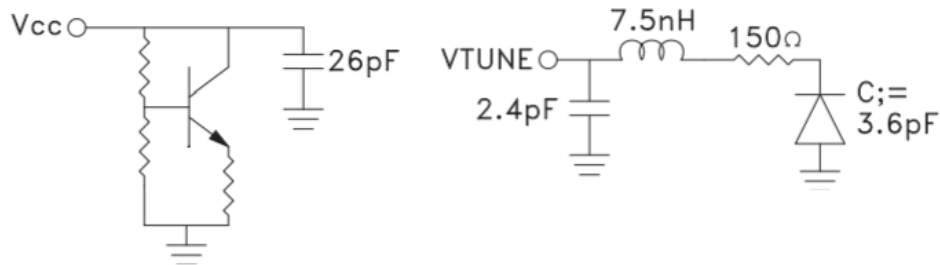
Por último, en la figura siguiente se muestran las dimensiones de dicho componente, así como su diagrama de funcionamiento.



FUENTE: Datasheet del componente HMC384LP4 de Analog Devices [12]

Figura 95-Mezclador HMC384LP4 de Analog Devices. (A) Dimensiones en mm. (B) Diagrama de funcionamiento.

Para conectar el componente, es necesario añadir una serie de condensadores a algunos de sus pines, según especifica el fabricante, como se muestra en la figura siguiente, obtenida del datasheet [12].



FUENTE: Datasheet del componente HMC384LP4 de Analog Devices [12]

Figura 96-Esquemático de los componentes a conectar para alimentar el HMC384LP4

4.3. Sistema RX

El sistema RX comprende el conjunto de componentes encargados de recibir una señal externa a la frecuencia de 15.7 GHz y potencia variable (en función de la configuración de la TX-Box), disminuirla a una longitud de onda variable y enviarla con una ganancia de 32.6 dB. La señal transmitida por la RX-Box se enviará a los componentes encargados de recibir y procesar la señal. Este sistema se compone de una caja “RX-Box” que alberga tanto la PCB de radiofrecuencia como la placa DC que alimenta a dicha PCB.

La potencia de entrada mínima y máxima en la RX-Box será de -100 y -7.5 dBm. La potencia máxima viene limitada por el P1dB del último amplificador de la cadena mientras que la potencia mínima está condicionada por la potencia mínima que transmite el TX-Box y la distancia máxima a la que se pueden encontrar ambos equipos.

Sin embargo, a diferencia de la TX-Box, se ofrece la posibilidad de obtener a la salida una señal con una frecuencia variable en función de la tensión a la que se alimente la RX-Box, según la gráfica que se observan en la figura y en la tabla siguiente.

Tabla 2-Requerimientos de tensión de alimentación y frecuencia de salida

	Valor máximo	Valor mínimo	Valor recomendado
Frecuencia salida (GHz)	2.4	1.55	2.4
Tensión de alimentación (V)	13	7.2	7.2

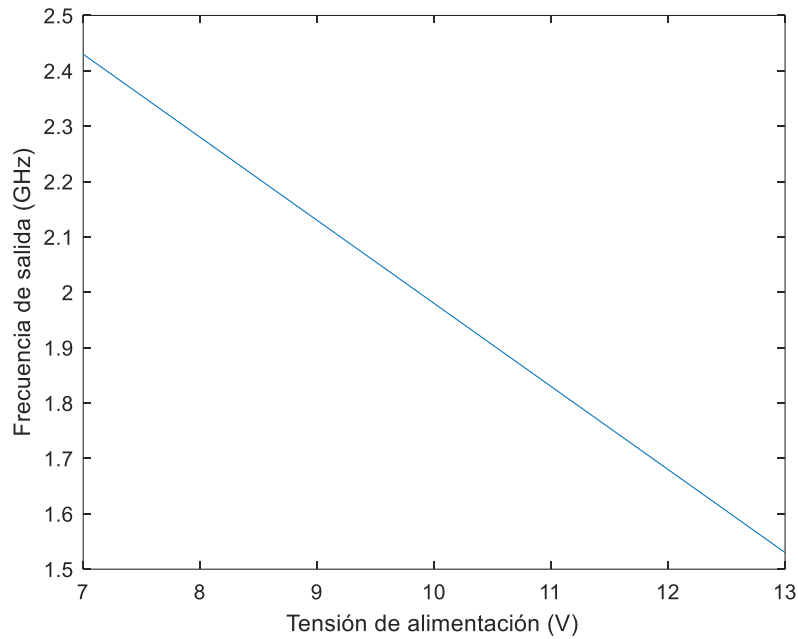


Figura 97-Tensión de alimentación del RX-Box VS Frecuencia de salida del RX-Box.

Cabe destacar que las simulaciones han sido realizadas tomando como referencia una señal de entrada de -94.7 dBm y 15.7 GHz, obteniendo a la salida una potencia de -62.2 dBm y 2.4 GHz. Para obtener esta transformación de señal, en la práctica, la TX-Box debe de ser alimentada a 7.2V.

La existencia de un valor máximo y mínimo de frecuencia de entrada está relacionada con la señal VTUNE del VCO de la PCB del RX-Box, así como de la tensión de entrada mínima a la cual funciona correctamente el regulador LM7805 de la placa de alimentación de la TX-Box.

En las secciones siguientes de este documento se detallará la caja del sistema RX, así como la placa de alimentación y PCB de radiofrecuencia.

4.3.1 Caja RX-Box

RX-Box es el nombre que recibe la caja en la que encuentran los componentes asociados a la recepción de la señal del Minisat (sin incluir a la antena Rx). Al igual que la TX-Box, se puede ver como una caja “negra” con dos conectores SMA (uno para introducir la señal de entrada y otro de salida), y dos clavijas en la parte superior en las que conectar la alimentación.

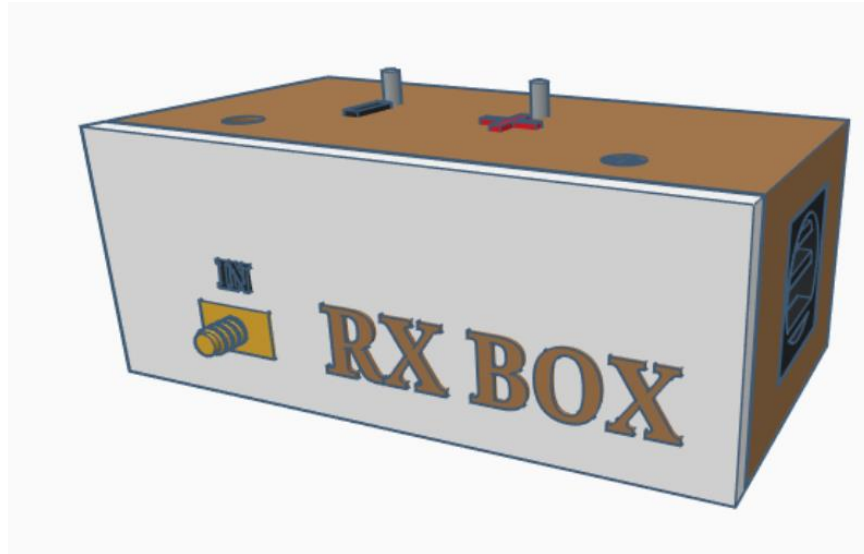


Figura 98- Dibujo en 3D de la RX-Box vista desde fuera

La caja posee una tapa lateral, para facilitar el montaje, que se encaja en la RX-Box mediante tornillos avellanados M3x8, así como una pegatina marrón en la que aparece serigráficoado “RX-Box”. En la figura siguiente se muestran las dos partes que han de unirse.

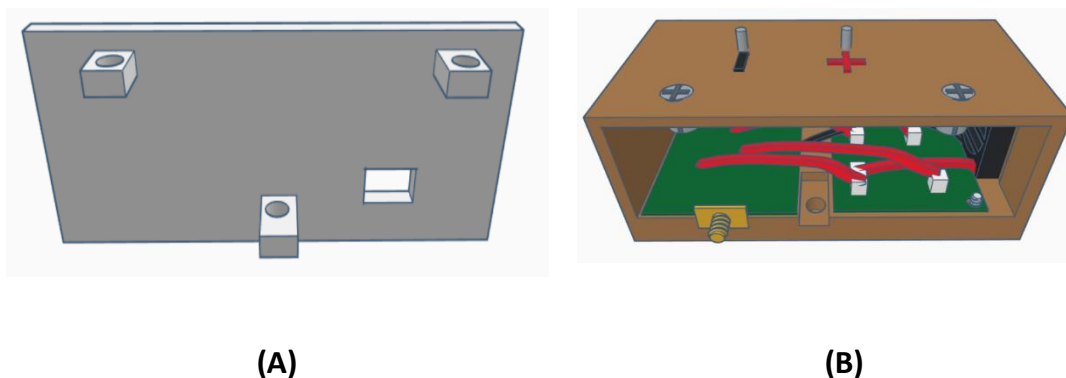
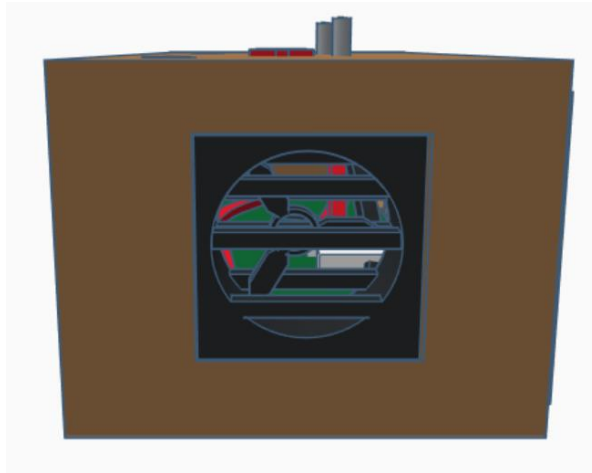


Figura 99-(A) Dibujo 3D de la parte interior de la tapa de la TX-Box. (B) RX-Box sin tapa

El material del que se compone, al igual que la TX-Box, tanto la estructura de la caja como la tapa lateral es acrílonitrilo butadieno estireno (ABS), por las mismas razones que se explicaron anteriormente.

En uno de los laterales, posee el mismo ventilador de 5V y 0.12A de la TX-Box, que se muestra en la figura siguiente, y anclado a la RX-Box mediante tornillos.



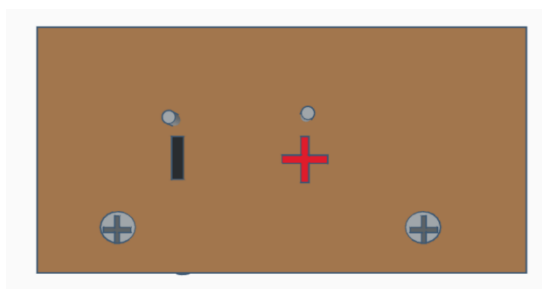
(A)



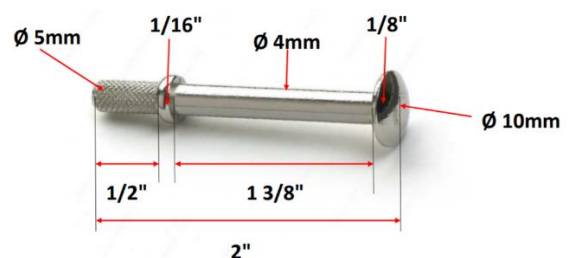
(B)

Figura 100-Ventilador de la RX-Box. (A) En el dibujo 3D. (B) Componente real de Cablematic

En la parte superior de la caja, posee dos clavijas para alimentar la TX-Box, como se muestra en la figura siguiente. Estas clavijas se fijan a la TX-Box con silicona. Dentro de la caja, se conectan mediante dos cables a la placa de alimentación.



(A)



(B)

Figura 101- Clavijas de alimentación. (A) Desde la parte superior del RX-Box. (B) Clavija real

En la parte trasera del RX-Box, posee una pegatina 6x3 cm en la que se muestra información y requerimiento de la caja, como se muestra en la figura siguiente.

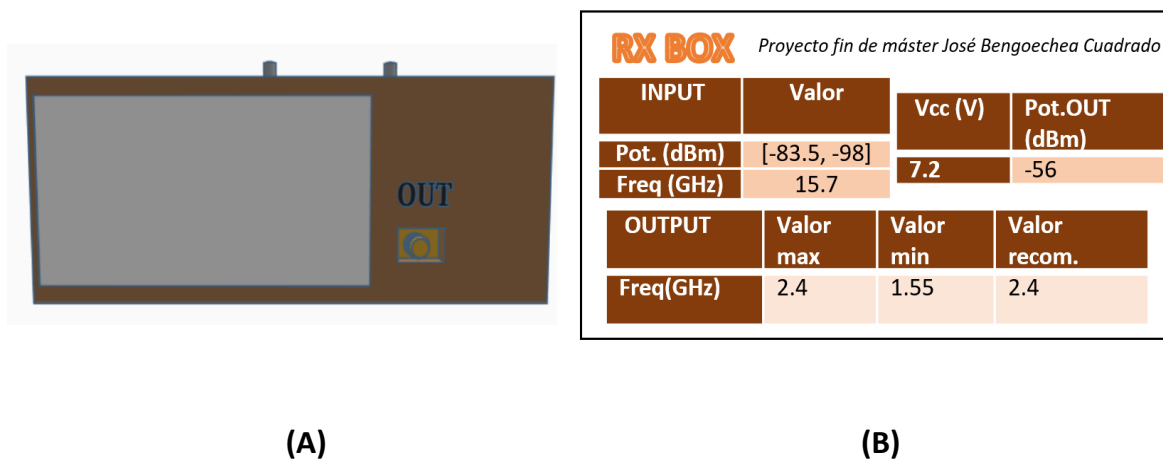


Figura 102-Pegatina con requerimientos de la RX-Box. (A) En la parte trasera del dibujo 3D. (B) Diseño real.

Por último, la PCB de radiofrecuencia y la placa de alimentación se encuentran en el interior de la misma forma que en la TX-Box y con las mismas medidas.

La PCB RF queda sujeta a la caja mediante los mismos conectores SMA y tornillos de la TX-Box. La alimentación DC queda fijada mediante las mismas tuercas M2x10 y roscas metálicas que en la TX-Box.

En la figura siguiente se muestra el interior de la caja, en donde se observan los conectores.

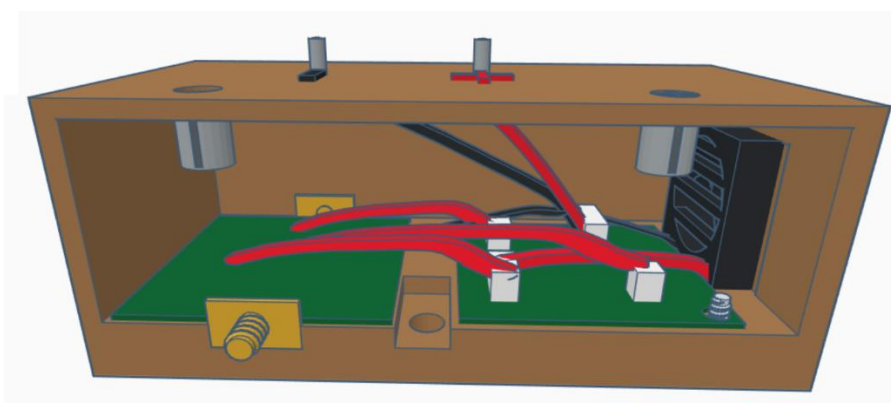


Figura 103-Fijación de las placas a la RX-Box desde el dibujo 3D

En el Anexo 8 de este documento, se muestra el plano de la RX-Box con las clavijas añadidas y el plano de la tapa.

4.1.2. PCB de radiofrecuencia

La PCB de radiofrecuencia es la que se encarga de recibir la señal de entrada con una potencia configurada en la TX-Box y frecuencia de 15.7 GHz, y enviarla con una ganancia de 32.6 dB y frecuencia variable (en función de la alimentación de la RX-Box).

Al igual que la PCB RF de la TX-Box, esta placa tiene dimensiones 5x5cm, dos conectores SMA (entrada y salida), y está formada por componentes MMIC sobre una placa de sustrato Rogers RO4003C. Debajo de éste, se encuentra una placa metálica que hace de tierra, de forma que las salidas de los componentes que van a tierra acceden a ésta mediante agujeros sobre la placa. En la figura siguiente, se muestra un esquemático de dicha placa.

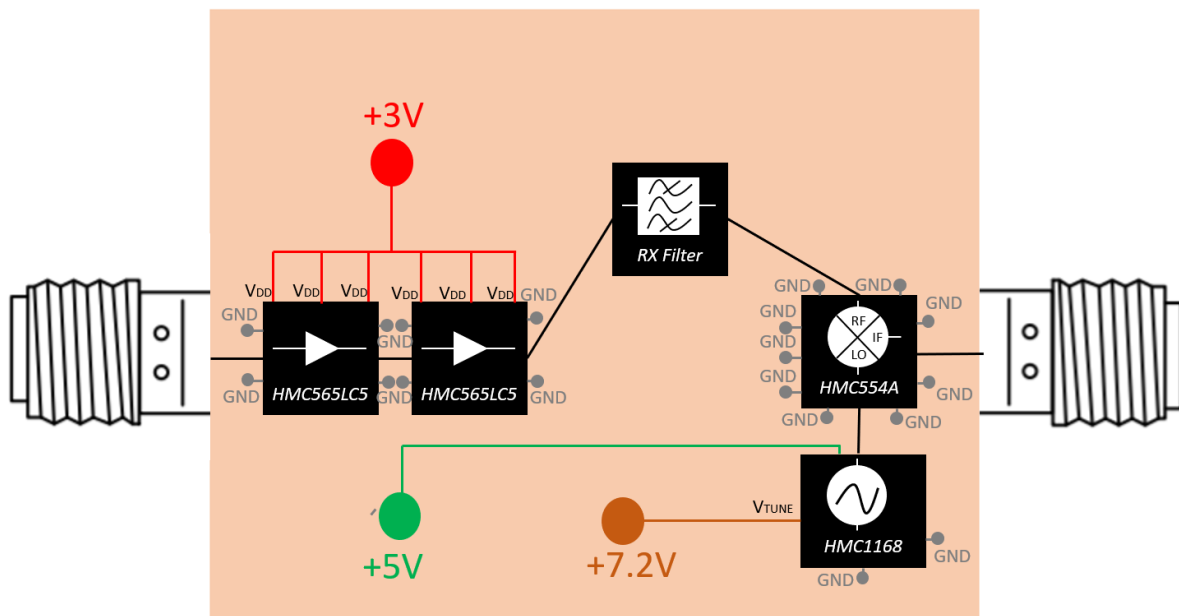


Figura 104- Diagrama de bloques orientativo de los componentes de la PCB de RF.

Cabe destacar que el esquemático que se muestra no representa ni en dimensiones ni en colocación de los bloques la PCB real, sino que es un diagrama de bloques que sirve únicamente de forma orientativa.

Así todo, se han evaluado las dimensiones de los componentes reales para comprobar que entran dentro de una placa de dimensiones 5x4cm.

Al igual que la PCB RF de la TX-Box, cada uno de los bloques en los que aparece representado cada componente abarca, no solo el componente en sí, sino el conjunto de elementos (condensadores, resistencias, bobinas, etc.) que son necesarios en cada uno.

- **Bloque HMC565LC5**

Son los bloques que corresponden con el modelo de amplificador HMC565LC5 de Analog Devices. Como se trata del mismo amplificador que se usa en la TX-Box, en la sección 4.1.2. fue detallado todo lo correspondiente a su funcionamiento, dimensiones, diagramas, etc.

- **Bloque RX Filter**

Es el bloque que corresponde con el filtro paso banda diseñado mediante el programa ADS en este proyecto. Se trata de un filtro hecho de líneas acopladas que tiene una $f_c=17.8$ GHz y un gran ancho de banda para permitir en un futuro, si hiciese falta, modificar moderadamente la frecuencia de entrada en la RX-Box.

Este filtro fue explicado en las simulaciones del capítulo anterior.

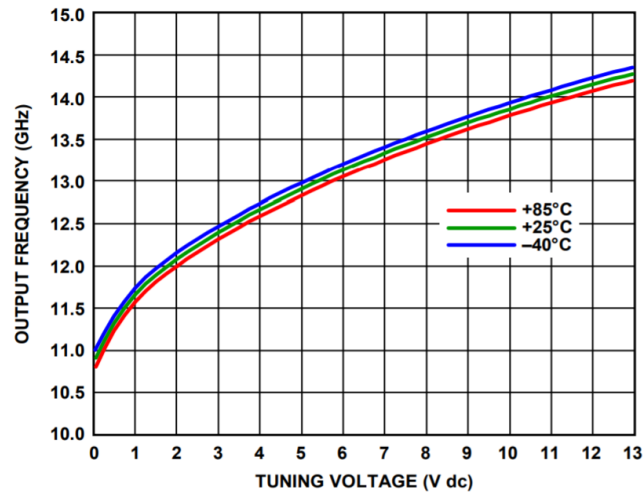
- **Bloque HMC554A**

Es el bloque que corresponde con el mezclador HMC554A de Analog Devices. En esta PCB, se encuentra en modo downconverter de forma que mezcla la señal de entrada (RF) menos la señal del oscilador (OL) para dar la señal (IF) que será la que terminará transmitiendo la RX-Box una vez pase por otra cadena de componentes.

Como se trata del mismo mezclador que se usa en la TX-Box, sus dimensiones y diagrama de funcionamiento fueron explicadas en la sección 4.1.2. de este documento.

- **Bloque HMC1168**

Es el bloque que corresponde con el VCO HMC1168 de Analog Devices. Este oscilador necesita una alimentación de 5V, así como una señal VTUNE que, en función de su valor de tensión, varía la frecuencia de la señal emitida por el oscilador. En la figura siguiente se muestra una gráfica de la variación de esta frecuencia en función de dicha tensión, obtenida del datasheet del componente [13].

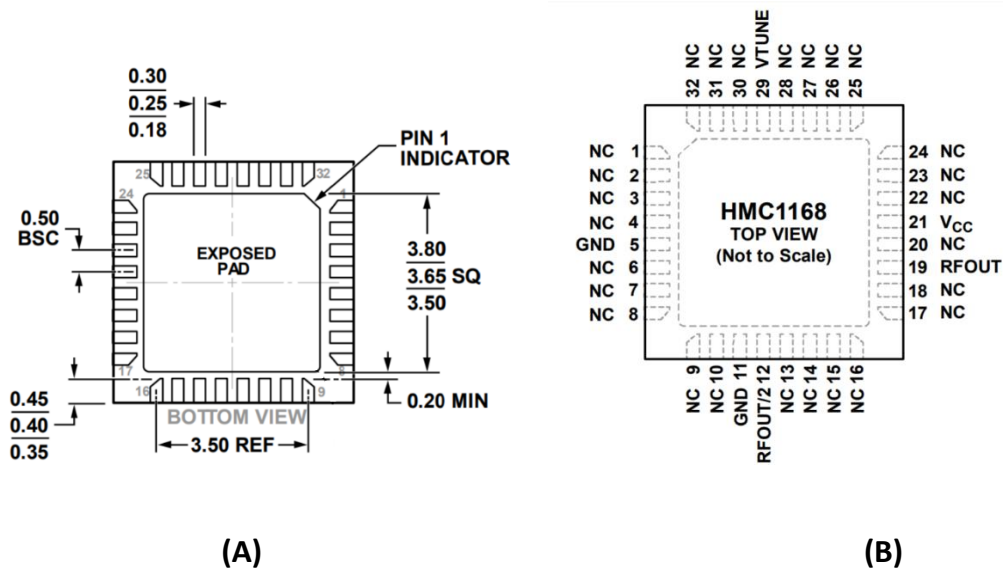


Fuente: Datasheet del componente HMC1168 de Analog Devices [13]

Figura 105-Tuning Voltage VS Output frequency del VCO HMC1168 de Analog Devices.

Como este mezclador transforma $RF-OL = IF$, un aumento de la tensión de VTUNE provoca un aumento de la frecuencia OL. Esto permite que, si se desea obtener a la salida una fIF baja, basta con aumentar la tensión de alimentación del RX-Box.

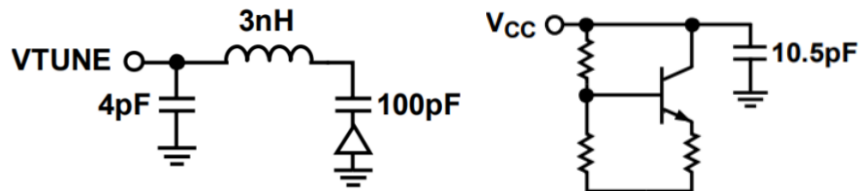
En la figura siguiente se muestran las dimensiones de dicho componente, así como su diagrama de funcionamiento.



FUENTE: Datasheet del componente HMC1168 de Analog Devices [13]

Figura 106-Mezclador HMC1168 de Analog Devices. (A) Dimensiones en mm. (B) Diagrama de funcionamiento.

La salida RFOUT/2 no se usa en este diseño. Para conectar el componente, basta con añadir una serie de componentes a sus entradas VTUNE y Vcc, que se muestran en la figura siguiente.



FUENTE: Datasheet del componente HMC1168 de Analog Devices [13]

Figura 107-Esquemático de los componentes a conectar para alimentar el HMC1168

4.1.3. Placa de alimentación RX-Box

La placa de alimentación de la RX-Box tiene como objeto suministrar y regular la tensión que alimenta a la PCB de radiofrecuencia y el ventilador. Para ello, se le alimenta con una tensión de entre 7.2 y 13V como en la TX-Box. Este rango de tensión, como se ha explicado anteriormente, está relacionado con la frecuencia de la señal de salida en la RX-Box.

Esta placa tiene las mismas dimensiones que la PCB de radiofrecuencia (5x5 cm) y, como se ha explicado anteriormente, queda fijada a la RX-Box mediante las mismas roscas y tuercas que en el TX-Box. En la siguiente figura, se muestra tanto el layout de la placa como el esquemático del circuito para la tensión de alimentación recomendada.

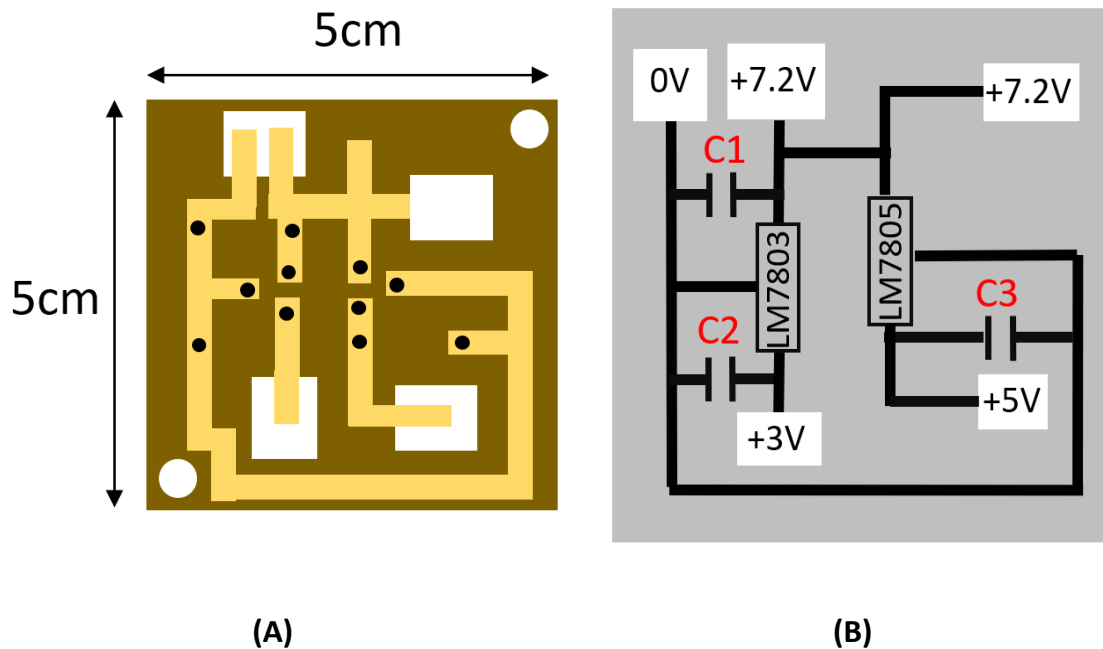


Figura 108-Placa de alimentación de la RX-Box. (A) Layout. (B) Esquemático.

Para la configuración recomendada, la tensión de entrada en la placa DC es de 7.2V, pues, como se ha explicado anteriormente, es aquella que permite obtener a la salida de la RX-Box una frecuencia de 2.4 GHz a partir de una entrada a 15.7 GHz.

El funcionamiento de la placa, así como los componentes utilizados es similar a la placa de alimentación de la TX-Box, que fue detallada en la sección 4.1.3. de este documento. En este caso, la PCB de RF consume 190 mA de la salida de 5V de la placa de alimentación, y 106 mA de la salida de 3V de dicha placa. Además, el ventilador consume 120mA. Por lo tanto, ambos reguladores son capaces de abarcar este consumo puesto que el fabricante especifica que el valor de corriente máxima que soportan los reguladores es de 1.5A.

4.4. Presupuesto

Como se ha explicado anteriormente, este proyecto nace con el fin de ser una herramienta de ayuda en las prácticas de la asignatura “Sistemas de telecomunicaciones” del máster de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Cantabria. Por lo que cabe destacar que en el diseño de los sistemas de este proyecto se ha hecho uso de algunos componentes que se encuentran en el laboratorio y no es necesaria su compra.

Así todo, el presupuesto que se muestra a continuación únicamente representa el coste de los materiales y componentes del prototipo de los 3 equipos. No se incluye ni el coste de la mano de obra, ni los gastos derivados del montaje de los equipos, etc.

En la tabla siguiente se muestra el coste de los materiales y componentes de la TX-Box completa (incluyendo todo lo que alberga en su interior).

Tabla 3-Coste total de la TX-Box completa. (A) Coste de la caja TX-Box. (B) Coste de la placa de alimentación. (C) Coste de la PCB de RF.

CAJA TX-BOX	(A)		
	Cantidad	Coste Unidad (€)	Coste Total (€)
<i>Impresión caja</i>	1	38,16	38,16
<i>Impresión tapa</i>	1	12,21	12,21
<i>Tornillos tapa-caja</i>	3	0,12	0,36
<i>Ventilador</i>	1	2,16	2,16
<i>Rosca metálica</i>	2	0,1	0,2
<i>Clavijas</i>	2	0,3	0,6
<i>Cables interiores</i>	2 metros	0,2	0,4
<i>Pegatinas</i>	5	0,15	0,75

PLACA ALIMENTACIÓN

(B)

	Cantidad	Coste Unidad (€)	Coste Total (€)
<i>Placa virgen baquelita bungard</i>	1	1,89	1,89
<i>Tornillos placa-caja</i>	2	0,09	0,18
<i>Conector cable-placa</i>	4	0,9	3,6
<i>Regulador LM7805</i>	1	0,51	0,51
<i>Regulador LM7803</i>	1	0,56	0,56
<i>Condensador de cerámica 0.1uF</i>	2	0,45	0,9
<i>Condensador de cerámica 0.33uF</i>	1	0,47	0,47

PCB DE RF

(C)

	Cantidad	Coste Unidad (€)	Coste Total (€)
<i>Placa Rogers RO4003C</i>	5x5cm	1,6	1,6
<i>Conector SMA PCB de RF</i>	2	4,7	9,4
<i>Lámina metálica</i>	1	0,62	0,62
<i>Amplificador. HMC565LC5</i>	2	33,09	66,18
<i>Mezclador HMC554A</i>	1	22,05	22,05
<i>VCO HMC632LP5</i>	1	22,55	22,55

Coste total de los materiales y componentes de la TX-Box completa: 185,35€

En la tabla siguiente se muestra el coste de los materiales y componentes del **MiniSAT** completo (incluyendo todo lo que alberga en su interior).

Tabla 4-Coste total de los materiales y componentes del MiniSAT completo. (A) Coste de la caja MiniSAT. (B) Coste de la batería interna. (C) Coste de la placa de alimentación. (D) Coste de la PCB de RF.

CAJA MINISAT		(A)	
	Cantidad	Coste Unidad (€)	Coste Total (€)
<i>Impresión caja</i>	1	86,2	86,2
<i>Impresión tapa</i>	1	28,8	28,8
<i>Tornillos tapa-caja</i>	4	0,14	0,56
<i>Ventilador</i>	3	2,16	6,48
<i>Placas solares</i>	8	4,89	39,12
<i>Cables semirrígidos</i>	2	1,87	3,74
<i>SMA caja interior-exterior</i>	2	1,9	3,8
<i>Conector IEC320 C14 con fusible</i>	1	3,74	3,74
<i>Cable de alimentación</i>	1	4,68	4,68
<i>Cables interiores</i>	5 metros	0,2	1
<i>Pegatinas</i>	3	0,15	0,45

BATERÍA INTERNA		(B)	
	Cantidad	Coste Unidad (€)	Coste Total (€)
<i>Pilas 18650</i>	6	2,25	13,5
<i>Tiras de níquel</i>	1	1,27	1,27
<i>Cinta Kapton</i>	1	3,35	3,35
<i>BMS 2s</i>	1	0,34	0,34
<i>Soporte pilas 18650</i>	1	1,16	1,16

PLACA DE ALIMENTACIÓN

(C)

	Cantidad	Coste Unidad (€)	Coste Total (€)
<i>Placa virgen baquelita bungard</i>	1	2,32	2,32
<i>Tornillos placa-caja</i>	4	0,09	0,36
<i>Conector cable-placa</i>	8	0,9	7,2
<i>Transformador TE06932</i>	1	10,75	10,75
<i>Diodos de silicio</i>	6	0,07	0,42
<i>Condensador electrolítico 2200uF</i>	1	0,72	0,72
<i>Condensador de cerámica 0.1uF</i>	3	0,45	1,35
<i>Condensador de cerámica 1uF</i>	3	0,35	1,05
<i>Condensador de cerámica 10uF</i>	2	0,58	1,16
<i>Regulador LM317</i>	2	0,66	1,32
<i>Regulador LM7805</i>	1	0,51	0,51
<i>Regulador LM7833</i>	1	0,36	0,36
<i>Regulador LM7803</i>	1	0,56	0,56
<i>Resistencias</i>	4	0,24	0,96
<i>Potenciómetro</i>	1	0,88	0,88

PCB DE RF

(D)

0

	Cantidad	Coste Unidad (€)	Coste Total (€)
<i>Placa Rogers RO4003C</i>	6x6,8cm	2,61	2,61
<i>Conector SMA PCB de RF</i>	2	4,7	9,4
<i>Lámina metálica</i>	1	0,82	0,82
<i>Amplificador HMC565LC5</i>	4	32,85	131,4
<i>Mezclador LTC5553</i>	1	22,05	22,05
<i>VCO HMC384LP4E</i>	1	7,63	7,63

Coste total de los materiales y componentes del MiniSAT completo: 399,41€

En la tabla siguiente se muestra el coste de los materiales y componentes de la **RX-Box** completa (incluyendo todo lo que alberga en su interior).

Tabla 5--Coste total de los materiales y componentes del RX-Box completo. (A) Coste de la caja RX-Box. (B) Coste de la placa de alimentación. (C) Coste de la PCB de RF.

CAJA RX-BOX

(A)

	Cantidad	Coste Unidad (€)	Coste Total (€)
<i>Impresión caja</i>	1	38,16	38,16
<i>Impresión tapa</i>	1	12,21	12,21
<i>Tornillos tapa-caja</i>	3	0,12	0,36
<i>Ventilador</i>	1	2,16	2,16
<i>Rosca metálica</i>	2	0,1	0,2
<i>Clavijas</i>	2	0,3	0,6
<i>Cables interiores</i>	2 metros	0,2	0,4
<i>Pegatinas</i>	5	0,15	0,75

PLACA ALIMENTACIÓN

(B)

	Cantidad	Coste Unidad (€)	Coste Total (€)
<i>Placa virgen baquelita bungard</i>	1	1,89	1,89
<i>Tornillos placa-caja</i>	2	0,09	0,18
<i>Conector cable-placa</i>	4	0,9	3,6
<i>Regulador LM7805</i>	1	0,51	0,51
<i>Regulador LM7803</i>	1	0,56	0,56
<i>Condensador de cerámica 0.1uF</i>	2	0,45	0,9
<i>Condensador de cerámica 0.33uF</i>	1	0,47	0,47

PCB DE RF

(C)

	Cantidad	Coste Unidad (€)	Coste Total (€)
<i>Placa Rogers RO4003C</i>	5x5cm	1,6	1,6
<i>Conector SMA PCB de RF</i>	2	4,7	9,4
<i>Lámina metálica</i>	1	0,62	0,62
<i>Amplif. HMC565LC5</i>	2	33,09	66,18
<i>Mezclador HMC554A</i>	1	22,05	22,05
<i>VCO HMC1168</i>	1	20,5	20,5

Coste total de los materiales y componentes de la RX-Box completa: 183,30€

En resumen, el **coste total de los materiales y componentes usados para fabricar los 3 equipos** es de:

768,06€

Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras

El objetivo de este proyecto es diseñar y simular un sistema que permita llevar a cabo, en las prácticas de la asignatura “Sistemas de Telecomunicación” del Máster de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria, una emulación de una comunicación vía satélite en banda Ku. Para ello, se diseñan 3 equipos asociados al transmisor, satélite y receptor.

En un principio, el objetivo inicial de este Trabajo de fin de Máster era poder desarrollar e implementar de forma real los tres equipos asociados al transmisor, satélite y receptor para que fueran usados en las prácticas de la asignatura al año siguiente. El proyecto se enfocaba en el sistema de radiofrecuencia que permitiese ascender o descender a la banda Ku, así como filtrar y amplificar la señal. Sin embargo, la situación mundial provocada por la pandemia del COVID-19 provocó la imposibilidad de llegar de implementar de forma real el proyecto por las restricciones de acceso a los laboratorios en los que se encuentran los instrumentos de medida necesarios.

Por esta razón, se decidió cambiar ligeramente el objetivo del proyecto limitándolo al diseño y simulación de los equipos únicamente de forma computacional, sin ser necesaria una parte presencial. Para suplir esa parte de desarrollo e implantación, y aportar un valor añadido al proyecto, se decidió, en primer lugar, realizar unas simulaciones y cálculos más elaborados de los que iban a ser en un principio. Por otra parte, se decidió diseñar un sistema de alimentación a cada equipo. En el caso del MiniSAT, este sistema abrió la posibilidad de que fuese autoalimentado mediante una batería interna que, finalmente, se le añadió incluso la posibilidad de cargarse mediante dos opciones: corriente alterna o continua procedente de paneles solares. Por último, para llevar a cabo este nuevo sistema era necesario diseñar una caja más elaborada que permitiese albergar cada equipo.

Finalmente, considero que todos estos cambios han permitido desarrollar un proyecto muy elaborado y más funcional, desde mi punto de vista, si finalmente se acaba implementando en el futuro.

Este cambio en el proyecto, además, personalmente me parece que ha sido un acierto pues abre muchas puertas para continuar desarrollándose en el futuro, mediante otro TFM o TFG.

En primer lugar, como principal línea futura, propongo fabricar los tres equipos y testarlos. Se trata de 3 sistemas, cada uno con su caja, placa DC, PCB de radiofrecuencia, ventiladores, cables, así como una batería y paneles solares en el MiniSAT. Considero que es una tarea muy elaborada.

Algunas otras líneas futuras que propongo para este proyecto están más orientadas a continuar mejorándolo antes de su fabricación. Desde diseñar las antenas de los 3 equipos hasta crear un sistema en el satélite que permita tener varios transceptores, como los satélites reales. La idea de tener transceptores permitiría que un grupo de alumnos transmita al MiniSAT a una frecuencia y, simultáneamente, otro grupo transmita al mismo a otra frecuencia. Esto, además, se puede llevar a cabo teniendo en cuenta que en este Trabajo de Fin de Máster se le ha dado la posibilidad a los equipos de variar las frecuencias de las señales en función de la alimentación que se les aplique, así como de la posición de un potenciómetro. Por supuesto, el desarrollo de esta propuesta también conllevaría llevar a cabo las pruebas y simulaciones pertinentes puesto que, en este proyecto, únicamente se ha simulado para un grupo de frecuencias fijas.

Bibliografía

- [1] ITU, “Recomendación UIT-R P.525-2: Cálculo de la atenuación en el espacio libre”, Agosto, 2019, pp. 2-3.
- [2] Analog Devices, “Datasheet del componente ADL5240”, rev 1, Febrero, 2017.
- [3] Minicircuits, “Datasheet del componente SYM-30DLHW”, vol 03, Noviembre, 2007.
- [4] Analog Devices, “Datasheet del componente ADL5611”, rev 2, Diciembre, 2015.
- [5] Analog Devices, “Datasheet del componente HMC554A”, rev 1, Octubre, 2019.
- [6] Analog Devices, “Datasheet del componente HMC565LC5”, vol 04, Octubre, 2019.
- [7] Analog Devices, “Datasheet del componente LTC5553”, 2017.
- [8] Analog Devices, “Datasheet del componente HMC632LP5”, vol 03, 2017.

- [9] Ten-Power, "Datasheet del componente LM78XX", rev 2.2, Julio, 2011.

- [10] STMicroelectronics, "Datasheet del componente L78", rev 34, Noviembre, 2016.

- [11] OMSemiconductor, "Datasheet del componente LM317", rev 3, Junio, 2002.

- [12] Analog Devices, "Datasheet del componente HMC384LP4", vol 02, 2017.

- [13] Analog Devices, "Datasheet del componente HMC1168", rev 1, Diciembre, 2017.

Anexo 1: Simulaciones en ADS: Ecuaciones para calcular la potencia y ganancia

- Referente al TX:

$$\text{Eqn } F_Index_tx = \text{find}(\text{mag}(\text{freq} - IF_In_tx.\text{noiseFreq}) < 0.1)$$

$$\text{Eqn } FirstIF_Index_tx = \text{find}(\text{mag}(\text{freq} - FirstIF_tx.\text{noiseFreq}) < 0.1)$$

$$\text{Eqn } RF_OutIndex_tx = \text{find}(\text{mag}(\text{freq} - RF_Out_tx.\text{noiseFreq}) < 0.1)$$

$$\text{Eqn } Mix1_In_dBm_tx = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(V_Mix1_In_tx[IF_Index_tx] * \text{conj}(I_Mix1_In_tx.i[IF_Index_tx])))) + 30$$

$$\text{Eqn } Gain_Mix1_In_tx = Mix1_In_dBm_tx + 60$$

$$\text{Eqn } Mix1_Out_dBm_tx = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(V_Mix1_Out_tx[FirstIF_Index_tx] * \text{conj}(I_Mix1_Out_tx.i[FirstIF_Index_tx])))) + 30$$

$$\text{Eqn } Gain_Mix1_Out_tx = Mix1_Out_dBm_tx + 60$$

$$\text{Eqn } Filt1_Out_dBm_tx = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(V_Filt1_Out_tx[FirstIF_Index_tx] * \text{conj}(I_Filt1_Out_tx.i[FirstIF_Index_tx])))) + 30$$

$$\text{Eqn } Gain_Filt1_Out_tx = Filt1_Out_dBm_tx + 60$$

$$\text{Eqn } Mix2_In_dBm_tx = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(V_Mix2_In_tx[FirstIF_Index_tx] * \text{conj}(I_Mix2_In_tx.i[FirstIF_Index_tx])))) + 30$$

$$\text{Eqn } Gain_Mix2_In_tx = Mix2_In_dBm_tx + 60$$

$$\text{Eqn } Mix2_Out_dBm_tx = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(V_Mix2_Out_tx[RF_OutIndex_tx] * \text{conj}(I_Mix2_Out_tx.i[RF_OutIndex_tx])))) + 30$$

$$\text{Eqn } Gain_Mix2_Out_tx = Mix2_Out_dBm_tx + 60$$

$$\text{Eqn } Filt2_Out_dBm_tx = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(V_Filt2_Out_tx[RF_OutIndex_tx] * \text{conj}(I_Filt2_Out_tx.i[RF_OutIndex_tx])))) + 30$$

$$\text{Eqn } Gain_Filt2_Out_tx = Filt2_Out_dBm_tx + 60$$

$$\text{Eqn } RF_Out_dBm_tx = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(V_RF_Out_tx[RF_OutIndex_tx] * \text{conj}(I_RF_Out_tx.i[RF_OutIndex_tx])))) + 30$$

$$\text{Eqn } Gain_Sys_tx = RF_Out_dBm_tx + 60$$

- Referente al SAT:

$$\text{Eqn } RF_Index_sat = \text{find}(\text{mag}(\text{freq} - RF_In_sat.\text{noiseFreq}) < 0.1)$$

$$\text{Eqn } F_OutIndex_sat = \text{find}(\text{mag}(\text{freq} - IF_Out_sat.\text{noiseFreq}) < 0.1)$$

$$\text{Eqn } Mix_In_dBm_sat = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(V_Mix_In_sat[RF_Index_sat] * \text{conj}(I_Mix_In_sat.i[RF_Index_sat])))) + 30$$

$$\text{Eqn } Gain_Mix_In_sat = Mix_In_dBm_sat + 81.87$$

$$\text{Eqn } Mix_Out_dBm_sat = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(V_Mix_Out_sat[IF_OutIndex_sat] * \text{conj}(I_Mix_Out_sat.i[IF_OutIndex_sat])))) + 30$$

$$\text{Eqn Gain_Mix_Out_sat} = \text{Mix_Out_dBm_sat} + 81.87$$

$$\text{Eqn Ilt_Out_dBm_sat} = 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(V_Filt_Out_sat[IF_OutIndex_sat] \cdot \text{conj}(I_Filt_Out_sat.i[IF_OutIndex_sat])))) + 30$$

$$\text{Eqn Gain_Filt_Out_sat} = \text{Filt_Out_dBm_sat} + 81.87$$

$$\text{Eqn IF_Out_dBm_sat} = 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(V_IF_Out_sat[IF_OutIndex_sat] \cdot \text{conj}(I_IF_Out_sat.i[IF_OutIndex_sat])))) + 30$$

$$\text{Eqn Gain_Sys_sat} = \text{IF_Out_dBm_sat} + 81.87$$

- *Referente al RX:*

$$\text{Eqn RF_Index_rx} = \text{find}(\text{mag}(\text{freq-RF_In_rx.noisefreq}) < 0.1)$$

$$\text{Eqn FirstIF_Index_rx} = \text{find}(\text{mag}(\text{freq-FirstIF_rx.noisefreq}) < 0.1)$$

$$\text{Eqn IF_OutIndex_rx} = \text{find}(\text{mag}(\text{freq-IF_Out_rx.noisefreq}) < 0.1)$$

$$\text{Eqn RF_In_dBm_rx} = 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(V_RF_In_rx[RF_Index_rx] \cdot \text{conj}(I_RF_In_rx.i[RF_Index_rx])))) + 30$$

$$\text{Eqn Mix1_In_dBm_rx} = 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(V_Mix1_In_rx[RF_Index_rx] \cdot \text{conj}(I_Mix1_In_rx.i[RF_Index_rx])))) + 30$$

$$\text{Eqn Gain_Mix1_In_rx} = \text{Mix1_In_dBm_rx} + 94.75$$

$$\text{Eqn Mix1_Out_dBm_rx} = 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(V_Mix1_Out_rx[FirstIF_Index_rx] \cdot \text{conj}(I_Mix1_Out_rx.i[FirstIF_Index_rx])))) + 30$$

$$\text{Eqn Gain_Mix1_Out_rx} = \text{Mix1_Out_dBm_rx} + 94.75$$

$$\text{Eqn Ilt1_Out_dBm_rx} = 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(V_Filt1_Out_rx[FirstIF_Index_rx] \cdot \text{conj}(I_Filt1_Out_rx.i[FirstIF_Index_rx])))) + 30$$

$$\text{Eqn Gain_Filt1_Out_rx} = \text{Filt1_Out_dBm_rx} + 94.75$$

$$\text{Eqn Mix2_In_dBm_rx} = 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(V_Mix2_In_rx[FirstIF_Index_rx] \cdot \text{conj}(I_Mix2_In_rx.i[FirstIF_Index_rx])))) + 30$$

$$\text{Eqn Gain_Mix2_In_rx} = \text{Mix2_In_dBm_rx} + 94.75$$

$$\text{Eqn Mix2_Out_dBm_rx} = 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(V_Mix2_Out_rx[IF_OutIndex_rx] \cdot \text{conj}(I_Mix2_Out_rx.i[IF_OutIndex_rx])))) + 30$$

$$\text{Eqn Gain_Mix2_Out_rx} = \text{Mix2_Out_dBm_rx} + 94.75$$

$$\text{Eqn Ilt2_Out_dBm_rx} = 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(V_Filt2_Out_rx[IF_OutIndex_rx] \cdot \text{conj}(I_Filt2_Out_rx.i[IF_OutIndex_rx])))) + 30$$

$$\text{Eqn Gain_Filt2_Out_rx} = \text{Filt2_Out_dBm_rx} + 94.75$$

$$\text{Eqn IF_Out_dBm_rx} = 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(V_IF_Out_rx[IF_OutIndex_rx] \cdot \text{conj}(I_IF_Out_rx.i[IF_OutIndex_rx])))) + 30$$

$$\text{Eqn Gain_Sys_rx} = \text{IF_Out_dBm_rx} + 94.75$$

Anexo 2: Simulaciones en ADS: Ecuaciones para calcular la figura de ruido

Partiendo de las ecuaciones de potencia y ganancia del Anexo 1, se añaden las siguientes:

- *Referente al TX:*

$$Eqn_{\text{Mix1_In_tx}} = V_{\text{Mix1_In_tx}}[IF_Index_tx] / I_{\text{Mix1_In_tx}}[IF_Index_tx]$$

$$Eqn_{\text{F_Mix1_In_tx}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{Mix1_In_tx}}.\text{noise}, 2))^{\text{real}(1/Z_{\text{Mix1_In_tx}})} / ((10^{**}(\text{Gain_Mix1_In_tx}/10)) \cdot (\text{boltzmann} \cdot \text{Kelvin} * 1))))$$

$$Eqn_{\text{Mix1_Out_tx}} = V_{\text{Mix1_Out_tx}}[\text{FirstIF_Index_tx}] / I_{\text{Mix1_Out_tx}}[\text{FirstIF_Index_tx}]$$

$$Eqn_{\text{F_Mix1_Out_tx}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{Mix1_Out_tx}}.\text{noise}, 2))^{\text{real}(1/Z_{\text{Mix1_Out_tx}})} / ((10^{**}(\text{Gain_Mix1_Out_tx}/10)) \cdot (\text{boltzmann} \cdot \text{Kelvin} * 1))))$$

$$Eqn_{\text{Filt1_Out_tx}} = V_{\text{Filt1_Out_tx}}[\text{FirstIF_Index_tx}] / I_{\text{Filt1_Out_tx}}[\text{FirstIF_Index_tx}]$$

$$Eqn_{\text{F_Filt1_Out_tx}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{Filt1_Out_tx}}.\text{noise}, 2))^{\text{real}(1/Z_{\text{Filt1_Out_tx}})} / ((10^{**}(\text{Gain_Filt1_Out_tx}/10)) \cdot (\text{boltzmann} \cdot \text{Kelvin} * 1))))$$

$$Eqn_{\text{Mix2_In_tx}} = V_{\text{Mix2_In_tx}}[\text{FirstIF_Index_tx}] / I_{\text{Mix2_In_tx}}[\text{FirstIF_Index_tx}]$$

$$Eqn_{\text{F_Mix2_In_tx}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{Mix2_In_tx}}.\text{noise}, 2))^{\text{real}(1/Z_{\text{Mix2_In_tx}})} / ((10^{**}(\text{Gain_Mix2_In_tx}/10)) \cdot (\text{boltzmann} \cdot \text{Kelvin} * 1))))$$

$$Eqn_{\text{Mix2_Out_tx}} = V_{\text{Mix2_Out_tx}}[\text{RF_OutIndex_tx}] / I_{\text{Mix2_Out_tx}}[\text{RF_OutIndex_tx}]$$

$$Eqn_{\text{F_Mix2_Out_tx}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{Mix2_Out_tx}}.\text{noise}, 2))^{\text{real}(1/Z_{\text{Mix2_Out_tx}})} / ((10^{**}(\text{Gain_Mix2_Out_tx}/10)) \cdot (\text{boltzmann} \cdot \text{Kelvin} * 1))))$$

$$Eqn_{\text{Filt2_Out_tx}} = V_{\text{Filt2_Out_tx}}[\text{RF_OutIndex_tx}] / I_{\text{Filt2_Out_tx}}[\text{RF_OutIndex_tx}]$$

$$Eqn_{\text{F_Filt2_Out_tx}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{Filt2_Out_tx}}.\text{noise}, 2))^{\text{real}(1/Z_{\text{Filt2_Out_tx}})} / ((10^{**}(\text{Gain_Filt2_Out_tx}/10)) \cdot (\text{boltzmann} \cdot \text{Kelvin} * 1))))$$

$$Eqn_{\text{RF_Out_tx}} = V_{\text{RF_Out_tx}}[\text{RF_OutIndex_tx}] / I_{\text{RF_Out_tx}}[\text{RF_OutIndex_tx}]$$

$$Eqn_{\text{F_Sys_tx}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{RF_Out_tx}}.\text{noise}, 2))^{\text{real}(1/Z_{\text{RF_Out_tx}})} / ((10^{**}(\text{Gain_Sys_tx}/10)) \cdot (\text{boltzmann} \cdot \text{Kelvin} * 1))))$$

- *Referente al SAT:*

$$Eqn_{\text{Mix_In_sat}} = V_{\text{Mix_In_sat}}[\text{RF_Index_sat}] / I_{\text{Mix_In_sat}}[\text{RF_Index_sat}]$$

$$Eqn_{\text{F_Mix_In_sat}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{Mix_In_sat}}.\text{noise}, 2))^{\text{real}(1/Z_{\text{Mix_In_sat}})} / ((10^{**}(\text{Gain_Mix_In_sat}/10)) \cdot (\text{boltzmann} \cdot \text{Kelvin} * 1))))$$

$$Eqn_{\text{Mix_Out_sat}} = V_{\text{Mix_Out_sat}}[\text{IF_OutIndex_sat}] / I_{\text{Mix_Out_sat}}[\text{IF_OutIndex_sat}]$$

$$Eqn_{\text{F_Mix_Out_sat}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{Mix_Out_sat}}.\text{noise}, 2))^{\text{real}(1/Z_{\text{Mix_Out_sat}})} / ((10^{**}(\text{Gain_Mix_Out_sat}/10)) \cdot (\text{boltzmann} \cdot \text{Kelvin} * 1))))$$

$$Eqn_{\text{Filt_Out_sat}} = V_{\text{Filt_Out_sat}}[\text{IF_OutIndex_sat}] / I_{\text{Filt_Out_sat}}[\text{IF_OutIndex_sat}]$$

$$Eqn_{\text{F_Filt_Out_sat}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{Filt_Out_sat}}.\text{noise}, 2))^{\text{real}(1/Z_{\text{Filt_Out_sat}})} / ((10^{**}(\text{Gain_Filt_Out_sat}/10)) \cdot (\text{boltzmann} \cdot \text{Kelvin} * 1))))$$

$$Eqn_{\text{IF_Out_sat}} = V_{\text{IF_Out_sat}}[\text{IF_OutIndex_sat}] / I_{\text{IF_Out_sat}}[\text{IF_OutIndex_sat}]$$

$$Eqn_{\text{F_Sys_sat}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{IF_Out_sat}}.\text{noise}, 2))^{\text{real}(1/Z_{\text{IF_Out_sat}})} / ((10^{**}(\text{Gain_Sys_sat}/10)) \cdot (\text{boltzmann} \cdot \text{Kelvin} * 1))))$$

- *Referente al RX:*

$$\text{Eqn: } V_{\text{Mix1_In_rx}} = V_{\text{Mix1_In_rx}}[\text{RF_Index_rx}] / I_{\text{Mix1_In_rx.i}}[\text{RF_Index_rx}]$$

$$\text{Eqn: } F_{\text{Mix1_In_rx}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{Mix1_In_rx.noise}}, 2)) * \text{real}(1/Z_{\text{Mix1_In_rx}})/((10^{**}(\text{Gain_Mix1_In_rx}/10)) * (\text{boltzmann} * \text{Kelvin} * 1))))$$

$$\text{Eqn: } V_{\text{Mix1_Out_rx}} = V_{\text{Mix1_Out_rx}}[\text{FirstIF_Index_rx}] / I_{\text{Mix1_Out_rx.i}}[\text{FirstIF_Index_rx}]$$

$$\text{Eqn: } F_{\text{Mix1_Out_rx}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{Mix1_Out_rx.noise}}, 2)) * \text{real}(1/Z_{\text{Mix1_Out_rx}})/((10^{**}(\text{Gain_Mix1_Out_rx}/10)) * (\text{boltzmann} * \text{Kelvin} * 1))))$$

$$\text{Eqn: } V_{\text{Filt1_Out_rx}} = V_{\text{Filt1_Out_rx}}[\text{FirstIF_Index_rx}] / I_{\text{Filt1_Out_rx.i}}[\text{FirstIF_Index_rx}]$$

$$\text{Eqn: } F_{\text{Filt1_Out_rx}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{Filt1_Out_rx.noise}}, 2)) * \text{real}(1/Z_{\text{Filt1_Out_rx}})/((10^{**}(\text{Gain_Filt1_Out_rx}/10)) * (\text{boltzmann} * \text{Kelvin} * 1))))$$

$$\text{Eqn: } V_{\text{Mix2_In_rx}} = V_{\text{Mix2_In_rx}}[\text{FirstIF_Index_rx}] / I_{\text{Mix2_In_rx.i}}[\text{FirstIF_Index_rx}]$$

$$\text{Eqn: } F_{\text{Mix2_In_rx}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{Mix2_In_rx.noise}}, 2)) * \text{real}(1/Z_{\text{Mix2_In_rx}})/((10^{**}(\text{Gain_Mix2_In_rx}/10)) * (\text{boltzmann} * \text{Kelvin} * 1))))$$

$$\text{Eqn: } V_{\text{Mix2_Out_rx}} = V_{\text{Mix2_Out_rx}}[\text{IF_OutIndex_rx}] / I_{\text{Mix2_Out_rx.i}}[\text{IF_OutIndex_rx}]$$

$$\text{Eqn: } F_{\text{Mix2_Out_rx}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{Mix2_Out_rx.noise}}, 2)) * \text{real}(1/Z_{\text{Mix2_Out_rx}})/((10^{**}(\text{Gain_Mix2_Out_rx}/10)) * (\text{boltzmann} * \text{Kelvin} * 1))))$$

$$\text{Eqn: } V_{\text{Filt2_Out_rx}} = V_{\text{Filt2_Out_rx}}[\text{IF_OutIndex_rx}] / I_{\text{Filt2_Out_rx.i}}[\text{IF_OutIndex_rx}]$$

$$\text{Eqn: } F_{\text{Filt2_Out_rx}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{Filt2_Out_rx.noise}}, 2)) * \text{real}(1/Z_{\text{Filt2_Out_rx}})/((10^{**}(\text{Gain_Filt2_Out_rx}/10)) * (\text{boltzmann} * \text{Kelvin} * 1))))$$

$$\text{Eqn: } V_{\text{IF_Out_rx}} = V_{\text{IF_Out_rx}}[\text{IF_OutIndex_rx}] / I_{\text{IF_Out_rx.i}}[\text{IF_OutIndex_rx}]$$

$$\text{Eqn: } F_{\text{Sys_rx}} = 10 \cdot \log(\text{abs}((\text{pow}(V_{\text{IF_Out_rx.noise}}, 2)) * \text{real}(1/Z_{\text{IF_Out_rx}})/((10^{**}(\text{Gain_Sys_rx}/10)) * (\text{boltzmann} * \text{Kelvin} * 1))))$$

Anexo 3: Simulaciones en ADS: Ecuaciones para calcular la ganancia de compresión

Para calcular la potencia en cada nudo:

- Referente al TX:

$$\text{Eqn} \text{ix1_In_dBm_tx} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_Mix1_In_tx}, \{0, 0, 0, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_Mix1_In_tx.i}, \{0, 0, 0, 0, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{ix1_Out_dBm_tx} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_Mix1_Out_tx}, \{1, 0, 0, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_Mix1_Out_tx.i}, \{1, 0, 0, 0, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{ilt1_Out_dBm_tx} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_Filt1_Out_tx}, \{1, 0, 0, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_Filt1_Out_tx.i}, \{1, 0, 0, 0, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{ix2_In_dBm_tx} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_Mix2_In_tx}, \{1, 0, 0, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_Mix2_In_tx.i}, \{1, 0, 0, 0, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{ix2_Out_dBm_tx} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_Mix2_Out_tx}, \{1, 1, 0, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_Mix2_Out_tx.i}, \{1, 1, 0, 0, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{ilt2_Out_dBm_tx} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_Filt2_Out_tx}, \{1, 1, 0, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_Filt2_Out_tx.i}, \{1, 1, 0, 0, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{F_Out_dBm_tx} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_RF_Out_tx}, \{1, 1, 0, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_RF_Out_tx.i}, \{1, 1, 0, 0, 1\})))))) + 30$$

- Referente al SAT:

$$\text{Eqn} \text{F_In_dBm_sat} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_RF_In_sat}, \{1, 1, 0, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_RF_In_sat.i}, \{1, 1, 0, 0, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{ix_In_dBm_sat} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_Mix_In_sat}, \{1, 1, 0, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_Mix_In_sat.i}, \{1, 1, 0, 0, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{ix_Out_dBm_sat} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_Mix_Out_sat}, \{1, 1, -1, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_Mix_Out_sat.i}, \{1, 1, -1, 0, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{ilt_Out_dBm_sat} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_Filt_Out_sat}, \{1, 1, -1, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_Filt_Out_sat.i}, \{1, 1, -1, 0, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{F_Out_dBm_sat} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_IF_Out_sat}, \{1, 1, -1, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_IF_Out_sat.i}, \{1, 1, -1, 0, 1\})))))) + 30$$

- Referente al RX:

$$\text{Eqn} \text{F_In_dBm_rx} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_RF_In_rx}, \{1, 1, -1, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_RF_In_rx.i}, \{1, 1, -1, 0, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{ix1_In_dBm_rx} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_Mix1_In_rx}, \{1, 1, -1, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_Mix1_In_rx.i}, \{1, 1, -1, 0, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{ix1_Out_dBm_rx} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_Mix1_Out_rx}, \{1, 1, -1, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_Mix1_Out_rx.i}, \{1, 1, -1, 0, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{ilt1_Out_dBm_rx} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_Filt1_Out_rx}, \{1, 1, -1, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_Filt1_Out_rx.i}, \{1, 1, -1, 0, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{ix2_In_dBm_rx} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_Mix2_In_rx}, \{1, 1, -1, 0, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_Mix2_In_rx.i}, \{1, 1, -1, 0, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{ix2_Out_dBm_rx} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_Mix2_Out_rx}, \{1, 1, -1, -1, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_Mix2_Out_rx.i}, \{1, 1, -1, -1, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{ilt2_Out_dBm_rx} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_Filt2_Out_rx}, \{1, 1, -1, -1, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_Filt2_Out_rx.i}, \{1, 1, -1, -1, 1\})))))) + 30$$

$$\text{Eqn} \text{F_Out_dBm_rx} = 10 * \log(\text{abs}(0.5 * \text{real}(\text{mix}(\text{V_IF_Out_rx}, \{1, 1, -1, -1, 1\}) * \text{conj}(\text{mix}(\text{I_IF_Out_rx.i}, \{1, 1, -1, -1, 1\})))))) + 30$$

Para calcular la ganancia de compresión:

$$\text{Eqn} \text{Gain} = \text{IF_Out_dBm_rx} - \text{Power_IF_tx}$$

$$\text{Eqn} \text{GainCompression} = \text{Gain}[m1, 0] - \text{Gain}$$

Anexo 4: Simulaciones en ADS: Ecuaciones para calcular el TOI y CIMD

Para calcular ambas potencias necesarias para el TOI:

- Referente al TX:

$$\begin{aligned} Eqn_{In_dBm_tx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_IF_In_tx, \{0,0,0,0,0,1,0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_IF_In_tx.i, \{0,0,0,0,0,1,0\})))))) + 30 \\ Eqn_{In_dBm_txIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_IF_In_tx, \{0,0,0,0,0,2,-1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_IF_In_tx.i, \{0,0,0,0,0,2,-1\})))))) + 30 \\ Eqn_{ix1_In_dBm_tx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix1_In_tx, \{0,0,0,0,0,1,0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix1_In_tx.i, \{0,0,0,0,0,1,0\})))))) + 30 \\ Eqn_{ix1_In_dBm_txIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix1_In_tx, \{0,0,0,0,0,2,-1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix1_In_tx.i, \{0,0,0,0,0,2,-1\})))))) + 30 \\ Eqn_{ix1_Out_dBm_tx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix1_Out_tx, \{1,0,0,0,0,1,0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix1_Out_tx.i, \{1,0,0,0,0,1,0\})))))) + 30 \\ Eqn_{ix1_Out_dBm_txIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix1_Out_tx, \{1,0,0,0,0,2,-1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix1_Out_tx.i, \{1,0,0,0,0,2,-1\})))))) + 30 \\ Eqn_{flt1_Out_dBm_tx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Filt1_Out_tx, \{1,0,0,0,0,1,0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Filt1_Out_tx.i, \{1,0,0,0,0,1,0\})))))) + 30 \\ Eqn_{flt1_Out_dBm_txIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Filt1_Out_tx, \{1,0,0,0,0,2,-1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Filt1_Out_tx.i, \{1,0,0,0,0,2,-1\})))))) + 30 \\ Eqn_{ix2_In_dBm_tx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix2_In_tx, \{1,0,0,0,0,1,0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix2_In_tx.i, \{1,0,0,0,0,1,0\})))))) + 30 \\ Eqn_{ix2_In_dBm_txIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix2_In_tx, \{1,0,0,0,0,2,-1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix2_In_tx.i, \{1,0,0,0,0,2,-1\})))))) + 30 \\ Eqn_{ix2_Out_dBm_tx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix2_Out_tx, \{1,1,0,0,0,1,0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix2_Out_tx.i, \{1,1,0,0,0,1,0\})))))) + 30 \\ Eqn_{ix2_Out_dBm_txIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix2_Out_tx, \{1,1,0,0,0,2,-1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix2_Out_tx.i, \{1,1,0,0,0,2,-1\})))))) + 30 \\ Eqn_{flt2_Out_dBm_tx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Filt2_Out_tx, \{1,1,0,0,0,1,0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Filt2_Out_tx.i, \{1,1,0,0,0,1,0\})))))) + 30 \\ Eqn_{flt2_Out_dBm_txIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Filt2_Out_tx, \{1,1,0,0,0,2,-1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Filt2_Out_tx.i, \{1,1,0,0,0,2,-1\})))))) + 30 \\ Eqn_{F_Out_dBm_tx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_RF_Out_tx, \{1,1,0,0,0,1,0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_RF_Out_tx.i, \{1,1,0,0,0,1,0\})))))) + 30 \\ Eqn_{F_Out_dBm_txIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_RF_Out_tx, \{1,1,0,0,0,2,-1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_RF_Out_tx.i, \{1,1,0,0,0,2,-1\})))))) + 30 \end{aligned}$$

- Referente al SAT:

$$\begin{aligned} Eqn_{F_In_dBm_sat} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_RF_In_sat, \{1,1,0,0,0,1,0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_RF_In_sat.i, \{1,1,0,0,0,1,0\})))))) + 30 \\ Eqn_{F_In_dBm_satIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_RF_In_sat, \{1,1,0,0,0,2,-1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_RF_In_sat.i, \{1,1,0,0,0,2,-1\})))))) + 30 \\ Eqn_{ix_In_dBm_sat} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix_In_sat, \{1,1,0,0,0,1,0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix_In_sat.i, \{1,1,0,0,0,1,0\})))))) + 30 \\ Eqn_{ix_In_dBm_satIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix_In_sat, \{1,1,0,0,0,2,-1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix_In_sat.i, \{1,1,0,0,0,2,-1\})))))) + 30 \\ Eqn_{ix_Out_dBm_satIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix_Out_sat, \{1,1,-1,0,0,2,-1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix_Out_sat.i, \{1,1,-1,0,0,2,-1\})))))) + 30 \\ Eqn_{flt_Out_dBm_sat} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Filt_Out_sat, \{1,1,-1,0,0,1,0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Filt_Out_sat.i, \{1,1,-1,0,0,1,0\})))))) + 30 \\ Eqn_{flt_Out_dBm_satIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Filt_Out_sat, \{1,1,-1,0,0,2,-1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Filt_Out_sat.i, \{1,1,-1,0,0,2,-1\})))))) + 30 \\ Eqn_{F_Out_dBm_sat} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_IF_Out_sat, \{1,1,-1,0,0,1,0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_IF_Out_sat.i, \{1,1,-1,0,0,1,0\})))))) + 30 \\ Eqn_{F_Out_dBm_satIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_IF_Out_sat, \{1,1,-1,0,0,2,-1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_IF_Out_sat.i, \{1,1,-1,0,0,2,-1\})))))) + 30 \end{aligned}$$

- Referente al RX:

$$\begin{aligned} \text{Eqn}_{F_In_dBm_rx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_RF_In_rx, \{1, 1, -1, 0, 0, 1, 0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_RF_In_rx.i, \{1, 1, -1, 0, 0, 1, 0\})))))) + 30 \\ \text{Eqn}_{F_In_dBm_rxIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_RF_In_rx, \{1, 1, -1, 0, 0, 2, -1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_RF_In_rx.i, \{1, 1, -1, 0, 0, 2, -1\})))))) + 30 \\ \text{Eqn}_{ix1_In_dBm_rx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix1_In_rx, \{1, 1, -1, 0, 0, 1, 0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix1_In_rx.i, \{1, 1, -1, 0, 0, 1, 0\})))))) + 30 \\ \text{Eqn}_{ix1_In_dBm_rxIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix1_In_rx, \{1, 1, -1, 0, 0, 2, -1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix1_In_rx.i, \{1, 1, -1, 0, 0, 2, -1\})))))) + 30 \\ \text{Eqn}_{ix1_Out_dBm_rx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix1_Out_rx, \{1, 1, -1, -1, 0, 1, 0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix1_Out_rx.i, \{1, 1, -1, -1, 0, 1, 0\})))))) + 30 \\ \text{Eqn}_{ix1_Out_dBm_rxIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix1_Out_rx, \{1, 1, -1, -1, 0, 2, -1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix1_Out_rx.i, \{1, 1, -1, -1, 0, 2, -1\})))))) + 30 \\ \text{Eqn}_{ilt1_Out_dBm_rx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Filt1_Out_rx, \{1, 1, -1, -1, 0, 1, 0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Filt1_Out_rx.i, \{1, 1, -1, -1, 0, 1, 0\})))))) + 30 \\ \text{Eqn}_{ilt1_Out_dBm_rxIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Filt1_Out_rx, \{1, 1, -1, -1, 0, 2, -1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Filt1_Out_rx.i, \{1, 1, -1, -1, 0, 2, -1\})))))) + 30 \\ \text{Eqn}_{ix2_In_dBm_rx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix2_In_rx, \{1, 1, -1, -1, 0, 1, 0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix2_In_rx.i, \{1, 1, -1, -1, 0, 1, 0\})))))) + 30 \\ \text{Eqn}_{ix2_In_dBm_rxIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix2_In_rx, \{1, 1, -1, -1, 0, 2, -1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix2_In_rx.i, \{1, 1, -1, -1, 0, 2, -1\})))))) + 30 \\ \text{Eqn}_{ix2_Out_dBm_rx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix2_Out_rx, \{1, 1, -1, -1, -1, 1, 0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix2_Out_rx.i, \{1, 1, -1, -1, -1, 1, 0\})))))) + 30 \\ \text{Eqn}_{ix2_Out_dBm_rxIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Mix2_Out_rx, \{1, 1, -1, -1, -1, 2, -1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Mix2_Out_rx.i, \{1, 1, -1, -1, -1, 2, -1\})))))) + 30 \\ \text{Eqn}_{ilt2_Out_dBm_rx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Filt2_Out_rx, \{1, 1, -1, -1, -1, 1, 0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Filt2_Out_rx.i, \{1, 1, -1, -1, -1, 1, 0\})))))) + 30 \\ \text{Eqn}_{ilt2_Out_dBm_rxIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_Filt2_Out_rx, \{1, 1, -1, -1, -1, 2, -1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_Filt2_Out_rx.i, \{1, 1, -1, -1, -1, 2, -1\})))))) + 30 \\ \text{Eqn}_{IF_Out_dBm_rx} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_IF_Out_rx, \{1, 1, -1, -1, -1, 1, 0\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_IF_Out_rx.i, \{1, 1, -1, -1, -1, 1, 0\})))))) + 30 \\ \text{Eqn}_{IF_Out_dBm_rxIMD} &= 10 \cdot \log(\text{abs}(0.5 \cdot \text{real}(\text{mix}(V_IF_Out_rx, \{1, 1, -1, -1, -1, 2, -1\}) * \text{conj}(\text{mix}(I_IF_Out_rx.i, \{1, 1, -1, -1, -1, 2, -1\})))))) + 30 \end{aligned}$$

Con las potencias obtenidas, para calcular el TOI Y CIMD en cada nodo:

- Referente al TX:

$$\begin{aligned} \text{Eqn}_{ix1_In_TOI_tx} &= 1.5 \cdot \text{Mix1_In_dBm_tx} - 0.5 \cdot \text{Mix1_In_dBm_txIMD} & \text{Eqn}_{ix1_In_CIMD_tx} &= \text{Mix1_In_dBm_tx} - \text{Mix1_In_dBm_txIMD} \\ \text{Eqn}_{ix1_Out_TOI_tx} &= 1.5 \cdot \text{Mix1_Out_dBm_tx} - 0.5 \cdot \text{Mix1_Out_dBm_txIMD} & \text{Eqn}_{ix1_Out_CIMD_tx} &= \text{Mix1_Out_dBm_tx} - \text{Mix1_Out_dBm_txIMD} \\ \text{Eqn}_{ilt1_Out_TOI_tx} &= 1.5 \cdot \text{Filt1_Out_dBm_tx} - 0.5 \cdot \text{Filt1_Out_dBm_txIMD} & \text{Eqn}_{ilt1_Out_CIMD_tx} &= \text{Filt1_Out_dBm_tx} - \text{Filt1_Out_dBm_txIMD} \\ \text{Eqn}_{ix2_In_TOI_tx} &= 1.5 \cdot \text{Mix2_In_dBm_tx} - 0.5 \cdot \text{Mix2_In_dBm_txIMD} & \text{Eqn}_{ix2_In_CIMD_tx} &= \text{Mix2_In_dBm_tx} - \text{Mix2_In_dBm_txIMD} \\ \text{Eqn}_{ix2_Out_TOI_tx} &= 1.5 \cdot \text{Mix2_Out_dBm_tx} - 0.5 \cdot \text{Mix2_Out_dBm_txIMD} & \text{Eqn}_{ix2_Out_CIMD_tx} &= \text{Mix2_Out_dBm_tx} - \text{Mix2_Out_dBm_txIMD} \\ \text{Eqn}_{ilt2_Out_TOI_tx} &= 1.5 \cdot \text{Filt2_Out_dBm_tx} - 0.5 \cdot \text{Filt2_Out_dBm_txIMD} & \text{Eqn}_{ilt2_Out_CIMD_tx} &= \text{Filt2_Out_dBm_tx} - \text{Filt2_Out_dBm_txIMD} \\ \text{Eqn}_{RF_Out_TOI_tx} &= 1.5 \cdot \text{RF_Out_dBm_tx} - 0.5 \cdot \text{RF_Out_dBm_txIMD} & \text{Eqn}_{RF_Out_CIMD_tx} &= \text{RF_Out_dBm_tx} - \text{RF_Out_dBm_txIMD} \end{aligned}$$

- Referente al SAT:

$$\begin{aligned} \text{Eqn}_{RF_In_TOI_sat} &= 1.5 \cdot \text{RF_In_dBm_sat} - 0.5 \cdot \text{RF_In_dBm_satIMD} & \text{Eqn}_{RF_In_CIMD_sat} &= \text{RF_In_dBm_sat} - \text{RF_In_dBm_satIMD} \\ \text{Eqn}_{Mix_In_TOI_sat} &= 1.5 \cdot \text{Mix_In_dBm_sat} - 0.5 \cdot \text{Mix_In_dBm_satIMD} & \text{Eqn}_{Mix_In_CIMD_sat} &= \text{Mix_In_dBm_sat} - \text{Mix_In_dBm_satIMD} \\ \text{Eqn}_{Mix_Out_TOI_sat} &= 1.5 \cdot \text{Mix_Out_dBm_sat} - 0.5 \cdot \text{Mix_Out_dBm_satIMD} & \text{Eqn}_{Mix_Out_CIMD_sat} &= \text{Mix_Out_dBm_sat} - \text{Mix_Out_dBm_satIMD} \\ \text{Eqn}_{ilt_Out_TOI_sat} &= 1.5 \cdot \text{Filt_Out_dBm_sat} - 0.5 \cdot \text{Filt_Out_dBm_satIMD} & \text{Eqn}_{ilt_Out_CIMD_sat} &= \text{Filt_Out_dBm_sat} - \text{Filt_Out_dBm_satIMD} \\ \text{Eqn}_{IF_Out_TOI_sat} &= 1.5 \cdot \text{IF_Out_dBm_sat} - 0.5 \cdot \text{IF_Out_dBm_satIMD} & \text{Eqn}_{IF_Out_CIMD_sat} &= \text{IF_Out_dBm_sat} - \text{IF_Out_dBm_satIMD} \end{aligned}$$

- *Referente al RX:*

$$\text{Eqn} \quad \text{RF_In_TOI_rx} = 1.5 \cdot \text{RF_In_dBm_rx} - 0.5 \cdot \text{RF_In_dBm_rx} \text{IMD}$$

$$\text{Eqn} \quad \text{Mix1_In_C IMD_rx} = \text{Mix1_In_dBm_rx} - \text{Mix1_In_dBm_rx} \text{IMD}$$

$$\text{Eqn} \quad \text{Mix1_In_TOI_rx} = 1.5 \cdot \text{Mix1_In_dBm_rx} - 0.5 \cdot \text{Mix1_In_dBm_rx} \text{IMD}$$

$$\text{Eqn} \quad \text{Mix1_Out_C IMD_rx} = \text{Mix1_Out_dBm_rx} - \text{Mix1_Out_dBm_rx} \text{IMD}$$

$$\text{Eqn} \quad \text{Mix1_Out_TOI_rx} = 1.5 \cdot \text{Mix1_Out_dBm_rx} - 0.5 \cdot \text{Mix1_Out_dBm_rx} \text{IMD}$$

$$\text{Eqn} \quad \text{Filt1_Out_C IMD_rx} = \text{Filt1_Out_dBm_rx} - \text{Filt1_Out_dBm_rx} \text{IMD}$$

$$\text{Eqn} \quad \text{Filt1_Out_TOI_rx} = 1.5 \cdot \text{Filt1_Out_dBm_rx} - 0.5 \cdot \text{Filt1_Out_dBm_rx} \text{IMD}$$

$$\text{Eqn} \quad \text{Mix2_In_C IMD_rx} = \text{Mix2_In_dBm_rx} - \text{Mix2_In_dBm_rx} \text{IMD}$$

$$\text{Eqn} \quad \text{Mix2_In_TOI_rx} = 1.5 \cdot \text{Mix2_In_dBm_rx} - 0.5 \cdot \text{Mix2_In_dBm_rx} \text{IMD}$$

$$\text{Eqn} \quad \text{Mix2_Out_C IMD_rx} = \text{Mix2_Out_dBm_rx} - \text{Mix2_Out_dBm_rx} \text{IMD}$$

$$\text{Eqn} \quad \text{Mix2_Out_TOI_rx} = 1.5 \cdot \text{Mix2_Out_dBm_rx} - 0.5 \cdot \text{Mix2_Out_dBm_rx} \text{IMD}$$

$$\text{Eqn} \quad \text{Filt2_Out_C IMD_rx} = \text{Filt2_Out_dBm_rx} - \text{Filt2_Out_dBm_rx} \text{IMD}$$

$$\text{Eqn} \quad \text{Filt2_Out_TOI_rx} = 1.5 \cdot \text{Filt2_Out_dBm_rx} - 0.5 \cdot \text{Filt2_Out_dBm_rx} \text{IMD}$$

$$\text{Eqn} \quad \text{F_Out_C IMD_rx} = \text{IF_Out_dBm_rx} - \text{IF_Out_dBm_rx} \text{IMD}$$

$$\text{Eqn} \quad \text{F_Out_TOI_rx} = 1.5 \cdot \text{IF_Out_dBm_rx} - 0.5 \cdot \text{IF_Out_dBm_rx} \text{IMD}$$

Anexo 5: Simulaciones en ADS: Ecuaciones para calcular el CNR

Para calcular ambas potencias de señal y ruido:

- *Referente al TX:*

$$\text{Eqn}_{\text{IF_In_tx}} = \text{mix}(\text{V_IF_In_tx}, \{0, 0, 0, 0, 0, 1\}) / \text{mix}(\text{I_IF_In_tx.i}, \{0, 0, 0, 0, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn}_{\text{Mix1_In_tx}} = \text{mix}(\text{V_Mix1_In_tx}, \{0, 0, 0, 0, 0, 1\}) / \text{mix}(\text{I_Mix1_In_tx.i}, \{0, 0, 0, 0, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn}_{\text{Mix1_Out_tx}} = \text{mix}(\text{V_Mix1_Out_tx}, \{1, 0, 0, 0, 0, 1\}) / \text{mix}(\text{I_Mix1_Out_tx.i}, \{1, 0, 0, 0, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn}_{\text{Filt1_Out_tx}} = \text{mix}(\text{V_Filt1_Out_tx}, \{1, 0, 0, 0, 0, 1\}) / \text{mix}(\text{I_Filt1_Out_tx.i}, \{1, 0, 0, 0, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn}_{\text{Mix2_In_tx}} = \text{mix}(\text{V_Mix2_In_tx}, \{1, 0, 0, 0, 0, 1\}) / \text{mix}(\text{I_Mix2_In_tx.i}, \{1, 0, 0, 0, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn}_{\text{Mix2_Out_tx}} = \text{mix}(\text{V_Mix2_Out_tx}, \{1, 1, 0, 0, 0, 1\}) / \text{mix}(\text{I_Mix2_Out_tx.i}, \{1, 1, 0, 0, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn}_{\text{Filt2_Out_tx}} = \text{mix}(\text{V_Filt2_Out_tx}, \{1, 1, 0, 0, 0, 1\}) / \text{mix}(\text{I_Filt2_Out_tx.i}, \{1, 1, 0, 0, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn}_{\text{RF_Out_tx}} = \text{mix}(\text{V_RF_Out_tx}, \{1, 1, 0, 0, 0, 1\}) / \text{mix}(\text{I_RF_Out_tx.i}, \{1, 1, 0, 0, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn}_{\text{noise_RF_Out_tx}} = ((\text{RF_Out_tx.Up_Converter1.V_RF_Out_tx.noise})^2) * \text{real}(1/Z_{\text{RF_Out_tx}})$$

$$\text{Eqn}_{\text{CNR_RF_Out_tx}} = \text{RF_Out_dBm_tx} - (10 * \log(\text{Noise_RF_Out_tx}) + 30)$$

$$\text{Eqn}_{\text{noise_Filt1_Out_tx}} = ((\text{FirstIF_tx.Up_Converter1.V_Filt1_Out_tx.noise})^2) * \text{real}(1/Z_{\text{Filt1_Out_tx}})$$

$$\text{Eqn}_{\text{CNR_Filt1_Out_tx}} = \text{Filt1_Out_dBm_tx} - (10 * \log(\text{Noise_Filt1_Out_tx}) + 30)$$

$$\text{Eqn}_{\text{noise_Mix1_Out_tx}} = ((\text{FirstIF_tx.Up_Converter1.V_Mix1_Out_tx.noise})^2) * \text{real}(1/Z_{\text{Mix1_Out_tx}})$$

$$\text{Eqn}_{\text{CNR_Mix1_Out_tx}} = \text{Mix1_Out_dBm_tx} - (10 * \log(\text{Noise_Mix1_Out_tx}) + 30)$$

$$\text{Eqn}_{\text{noise_Mix1_In_tx}} = ((\text{IF_In_tx.Up_Converter1.V_Mix1_In_tx.noise})^2) * \text{real}(1/Z_{\text{Mix1_In_tx}})$$

$$\text{Eqn}_{\text{CNR_Mix1_In_tx}} = \text{Mix1_In_dBm_tx} - (10 * \log(\text{Noise_Mix1_In_tx}) + 30)$$

$$\text{Eqn}_{\text{noise_Filt2_Out_tx}} = ((\text{RF_Out_tx.Up_Converter1.V_Filt2_Out_tx.noise})^2) * \text{real}(1/Z_{\text{Filt2_Out_tx}})$$

$$\text{Eqn}_{\text{CNR_Filt2_Out_tx}} = \text{Filt2_Out_dBm_tx} - (10 * \log(\text{Noise_Filt2_Out_tx}) + 30)$$

$$\text{Eqn}_{\text{noise_Mix2_Out_tx}} = ((\text{RF_Out_tx.Up_Converter1.V_Mix2_Out_tx.noise})^2) * \text{real}(1/Z_{\text{Mix2_Out_tx}})$$

$$\text{Eqn}_{\text{CNR_Mix2_Out_tx}} = \text{Mix2_Out_dBm_tx} - (10 * \log(\text{Noise_Mix2_Out_tx}) + 30)$$

$$\text{Eqn}_{\text{noise_Mix2_In_tx}} = ((\text{FirstIF_tx.Up_Converter1.V_Mix2_In_tx.noise})^2) * \text{real}(1/Z_{\text{Mix2_In_tx}})$$

$$\text{Eqn}_{\text{CNR_Mix2_In_tx}} = \text{Mix2_In_dBm_tx} - (10 * \log(\text{Noise_Mix2_In_tx}) + 30)$$

$$\text{Eqn}_{\text{noise_IF_In_tx}} = ((\text{IF_In_tx.Up_Converter1.V_IF_In_tx.noise})^2) * \text{real}(1/Z_{\text{IF_In_tx}})$$

$$\text{Eqn}_{\text{CNR_IF_In_tx}} = \text{IF_In_dBm_tx} - (10 * \log(\text{Noise_IF_In_tx}) + 30)$$

- *Referente al SAT:*

$$\text{Eqn } Z_{\text{RF_In_sat}} = \text{mix}(V_{\text{RF_In_sat}}, \{1, 1, 0, 0, 0, 1\}) / \text{mix}(I_{\text{RF_In_sat.i}}, \{1, 1, 0, 0, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn } Z_{\text{Mix_In_sat}} = \text{mix}(V_{\text{Mix_In_sat}}, \{1, 1, 0, 0, 0, 1\}) / \text{mix}(I_{\text{Mix_In_sat.i}}, \{1, 1, 0, 0, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn } Z_{\text{Mix_Out_sat}} = \text{mix}(V_{\text{Mix_Out_sat}}, \{1, 1, -1, 0, 0, 1\}) / \text{mix}(I_{\text{Mix_Out_sat.i}}, \{1, 1, -1, 0, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn } Z_{\text{Filt_Out_sat}} = \text{mix}(V_{\text{Filt_Out_sat}}, \{1, 1, -1, 0, 0, 1\}) / \text{mix}(I_{\text{Filt_Out_sat.i}}, \{1, 1, -1, 0, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn } Z_{\text{IF_Out_sat}} = \text{mix}(V_{\text{IF_Out_sat}}, \{1, 1, -1, 0, 0, 1\}) / \text{mix}(I_{\text{IF_Out_sat.i}}, \{1, 1, -1, 0, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn } \text{Noise_IF_Out_sat} = ((\text{IF_Out_sat.X3.V_IF_Out_sat.noise})^{**2}) * \text{real}(1/Z_{\text{IF_Out_sat}})$$

$$\text{Eqn } \text{CNR_IF_Out_sat} = \text{IF_Out_dBm_sat} - (10 * \log(\text{Noise_IF_Out_sat}) + 30)$$

$$\text{Eqn } \text{Noise_Filt_Out_sat} = ((\text{IF_Out_sat.X3.V_Filt_Out_sat.noise})^{**2}) * \text{real}(1/Z_{\text{Filt_Out_sat}})$$

$$\text{Eqn } \text{CNR_Filt_Out_sat} = \text{Filt_Out_dBm_sat} - (10 * \log(\text{Noise_Filt_Out_sat}) + 30)$$

$$\text{Eqn } \text{Noise_Mix_Out_sat} = ((\text{IF_Out_sat.X3.V_Mix_Out_sat.noise})^{**2}) * \text{real}(1/Z_{\text{Mix_Out_sat}})$$

$$\text{Eqn } \text{CNR_Mix_Out_sat} = \text{Mix_Out_dBm_sat} - (10 * \log(\text{Noise_Mix_Out_sat}) + 30)$$

$$\text{Eqn } \text{Noise_Mix_In_sat} = ((\text{RF_In_sat.X3.V_Mix_In_sat.noise})^{**2}) * \text{real}(1/Z_{\text{Mix_In_sat}})$$

$$\text{Eqn } \text{CNR_Mix_In_sat} = \text{Mix_In_dBm_sat} - (10 * \log(\text{Noise_Mix_In_sat}) + 30)$$

$$\text{Eqn } \text{Noise_RF_In_sat} = ((\text{RF_In_sat.X3.V_RF_In_sat.noise})^{**2}) * \text{real}(1/Z_{\text{RF_In_sat}})$$

$$\text{Eqn } \text{CNR_RF_In_sat} = \text{RF_In_dBm_sat} - (10 * \log(\text{Noise_RF_In_sat}) + 30)$$

- *Referente al RX:*

$$\text{Eqn } Z_{\text{RF_In_rx}} = \text{mix}(V_{\text{RF_In_rx}}, \{1, 1, -1, 0, 0, 1\}) / \text{mix}(I_{\text{RF_In_rx.i}}, \{1, 1, -1, 0, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn } Z_{\text{Mix1_In_rx}} = \text{mix}(V_{\text{Mix1_In_rx}}, \{1, 1, -1, 0, 0, 1\}) / \text{mix}(I_{\text{Mix1_In_rx.i}}, \{1, 1, -1, 0, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn } Z_{\text{Mix1_Out_rx}} = \text{mix}(V_{\text{Mix1_Out_rx}}, \{1, 1, -1, -1, 0, 1\}) / \text{mix}(I_{\text{Mix1_Out_rx.i}}, \{1, 1, -1, -1, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn } Z_{\text{Filt1_Out_rx}} = \text{mix}(V_{\text{Filt1_Out_rx}}, \{1, 1, -1, -1, 0, 1\}) / \text{mix}(I_{\text{Filt1_Out_rx.i}}, \{1, 1, -1, -1, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn } Z_{\text{Mix2_In_rx}} = \text{mix}(V_{\text{Mix2_In_rx}}, \{1, 1, -1, -1, 0, 1\}) / \text{mix}(I_{\text{Mix2_In_rx.i}}, \{1, 1, -1, -1, 0, 1\})$$

$$\text{Eqn } Z_{\text{Mix2_Out_rx}} = \text{mix}(V_{\text{Mix2_Out_rx}}, \{1, 1, -1, -1, -1, 1\}) / \text{mix}(I_{\text{Mix2_Out_rx.i}}, \{1, 1, -1, -1, -1, 1\})$$

$$\text{Eqn } Z_{\text{Filt2_Out_rx}} = \text{mix}(V_{\text{Filt2_Out_rx}}, \{1, 1, -1, -1, -1, 1\}) / \text{mix}(I_{\text{Filt2_Out_rx.i}}, \{1, 1, -1, -1, -1, 1\})$$

$$\text{Eqn } Z_{\text{IF_Out_rx}} = \text{mix}(V_{\text{IF_Out_rx}}, \{1, 1, -1, -1, -1, 1\}) / \text{mix}(I_{\text{IF_Out_rx.i}}, \{1, 1, -1, -1, -1, 1\})$$

Eqn Noise_IF_Out_rx=((IF_Out_rx.DDC_AMFAMFA1.V_IF_Out_rx.noise)**2)*real(1/Z_IF_Out_rx)

Eqn CNR_IF_Out_rx=IF_Out_dBm_rx-(10*log(Noise_IF_Out_rx)+30)

Eqn Noise_Filt1_Out_rx=((FirstIF_rx.DDC_AMFAMFA1.V_Filt1_Out_rx.noise)**2)*real(1/Z_Filt1_Out_rx)

Eqn CNR_Filt1_Out_rx=Filt1_Out_dBm_rx-(10*log(Noise_Filt1_Out_rx)+30)

Eqn Noise_Mix1_Out_rx=((FirstIF_rx.DDC_AMFAMFA1.V_Mix1_Out_rx.noise)**2)*real(1/Z_Mix1_Out_rx)

Eqn CNR_Mix1_Out_rx=Mix1_Out_dBm_rx-(10*log(Noise_Mix1_Out_rx)+30)

Eqn Noise_Mix1_In_rx=((RF_In_rx.DDC_AMFAMFA1.V_Mix1_In_rx.noise)**2)*real(1/Z_Mix1_In_rx)

Eqn CNR_Mix1_In_rx=Mix1_In_dBm_rx-(10*log(Noise_Mix1_In_rx)+30)

Eqn Noise_Filt2_Out_rx=((IF_Out_rx.DDC_AMFAMFA1.V_Filt2_Out_rx.noise)**2)*real(1/Z_Filt2_Out_rx)

Eqn CNR_Filt2_Out_rx=Filt2_Out_dBm_rx-(10*log(Noise_Filt2_Out_rx)+30)

Eqn Noise_Mix2_Out_rx=((IF_Out_rx.DDC_AMFAMFA1.V_Mix2_Out_rx.noise)**2)*real(1/Z_Mix2_Out_rx)

Eqn CNR_Mix2_Out_rx=Mix2_Out_dBm_rx-(10*log(Noise_Mix2_Out_rx)+30)

Eqn Noise_Mix2_In_rx=((FirstIF_rx.DDC_AMFAMFA1.V_Mix2_In_rx.noise)**2)*real(1/Z_Mix2_In_rx)

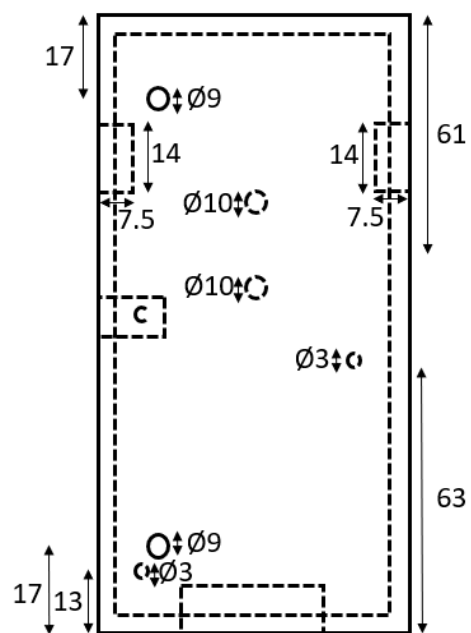
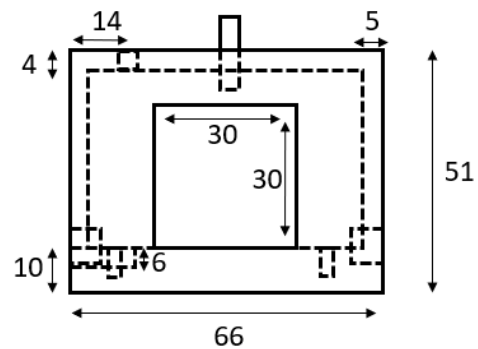
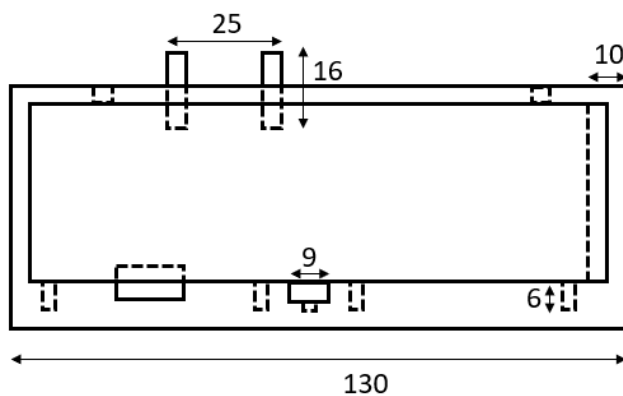
Eqn CNR_Mix2_In_rx=Mix2_In_dBm_rx-(10*log(Noise_Mix2_In_rx)+30)

Eqn Noise_RF_In_rx=((RF_In_rx.DDC_AMFAMFA1.V_RF_In_rx.noise)**2)*real(1/Z_RF_In_rx)

Eqn CNR_RF_In_rx=RF_In_dBm_rx-(10*log(Noise_RF_In_rx)+30)

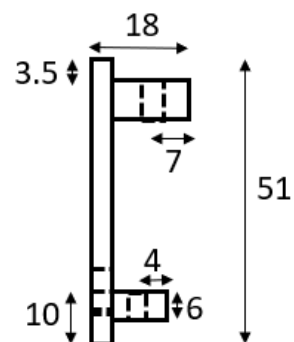
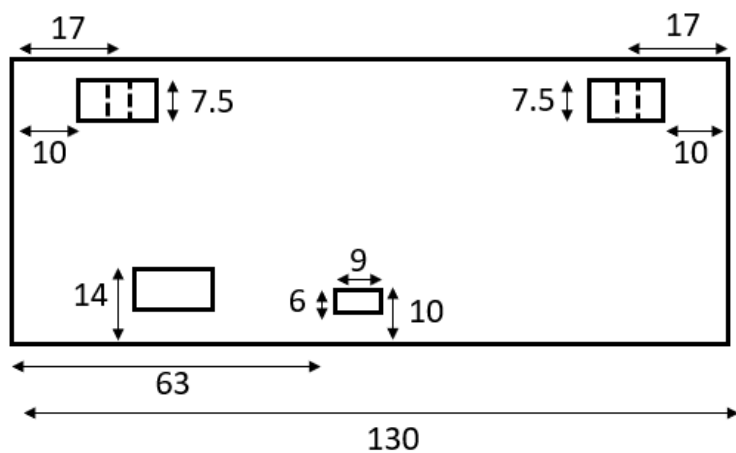
Anexo 6: Planos de la TX-Box

(A) Plano de la TX-Box sin tapa

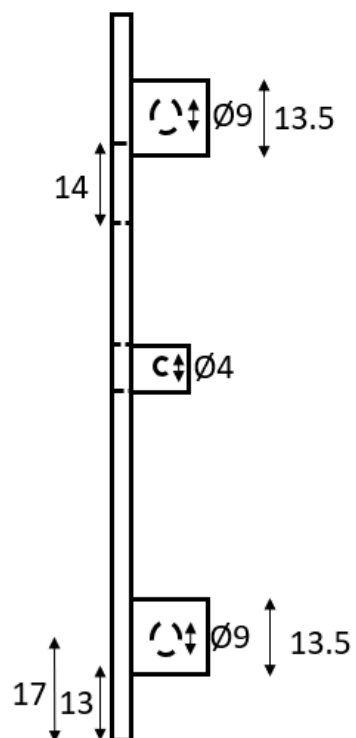


Todas las medidas son en mm

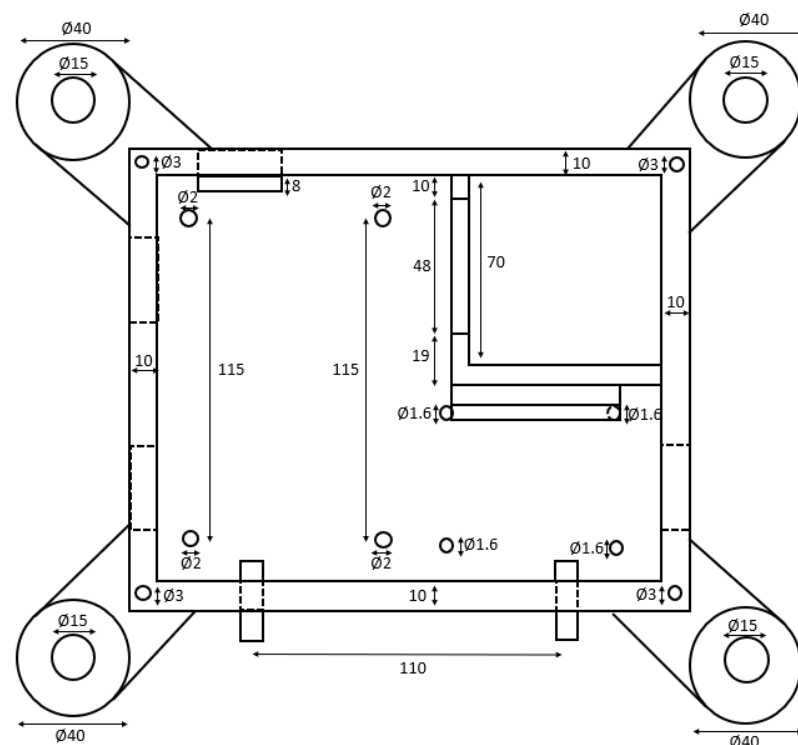
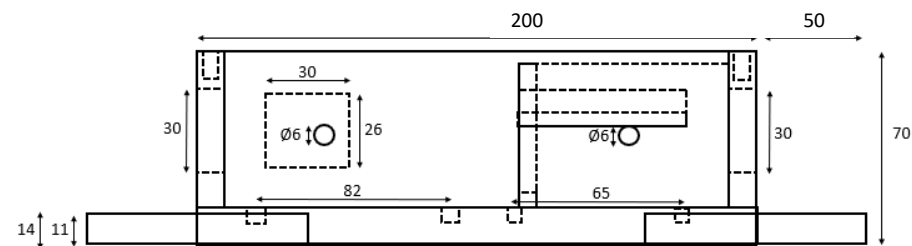
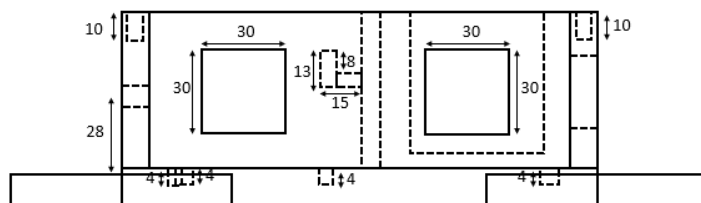
(B) Plano de la tapa de la TX-Box



Todas las medidas son en mm

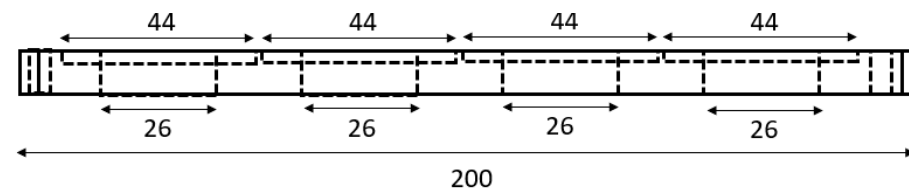
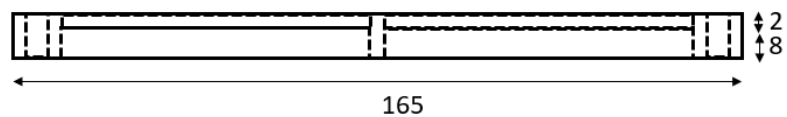


Anexo 7: Planos del MiniSAT



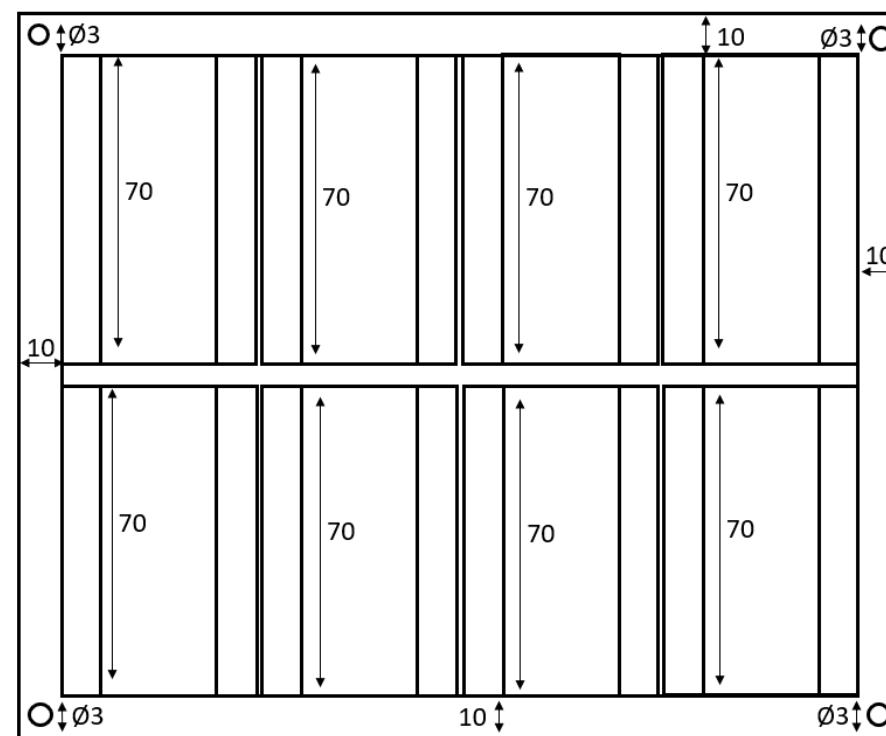
Todas las medidas están en mm

(A) Plano del MiniSAT sin tapa



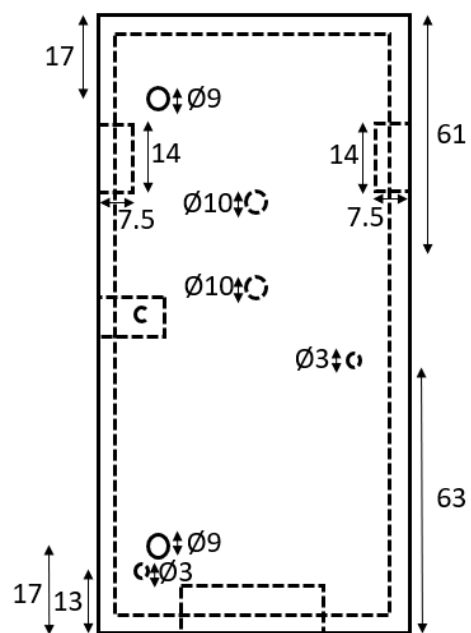
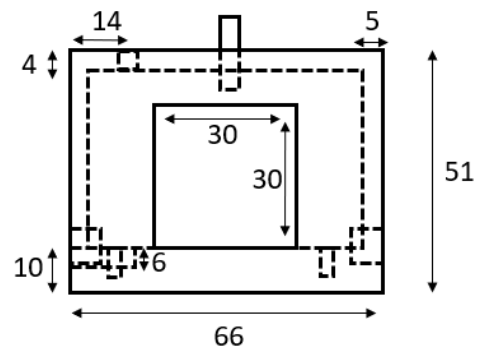
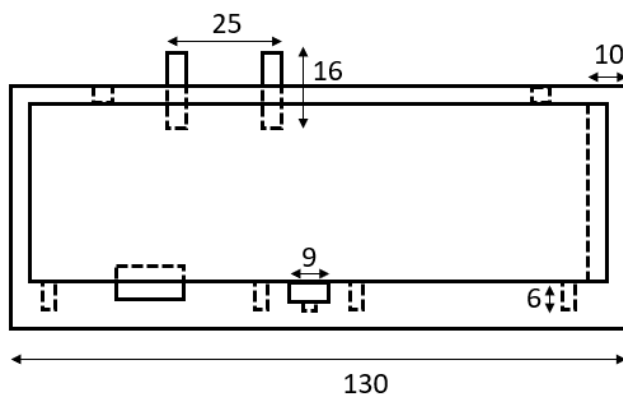
Todas las medidas están en mm

(B) Plano de la tapa del MiniSAT



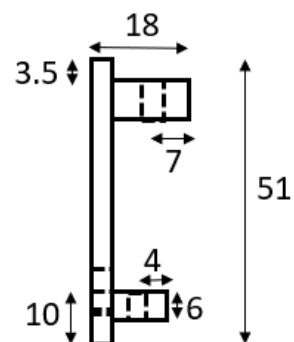
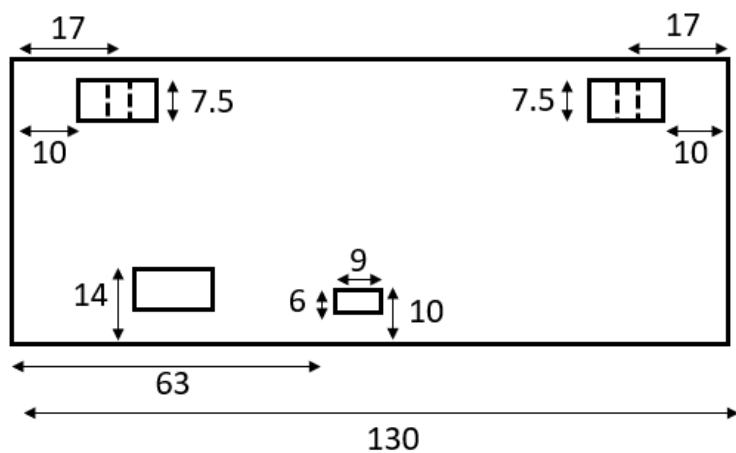
Anexo 8: Planos de la RX-Box

(A) Plano de la RX-Box sin tapa



Todas las medidas son en mm

(B) Plano de la tapa de la RX-Box



Todas las medidas son en mm

